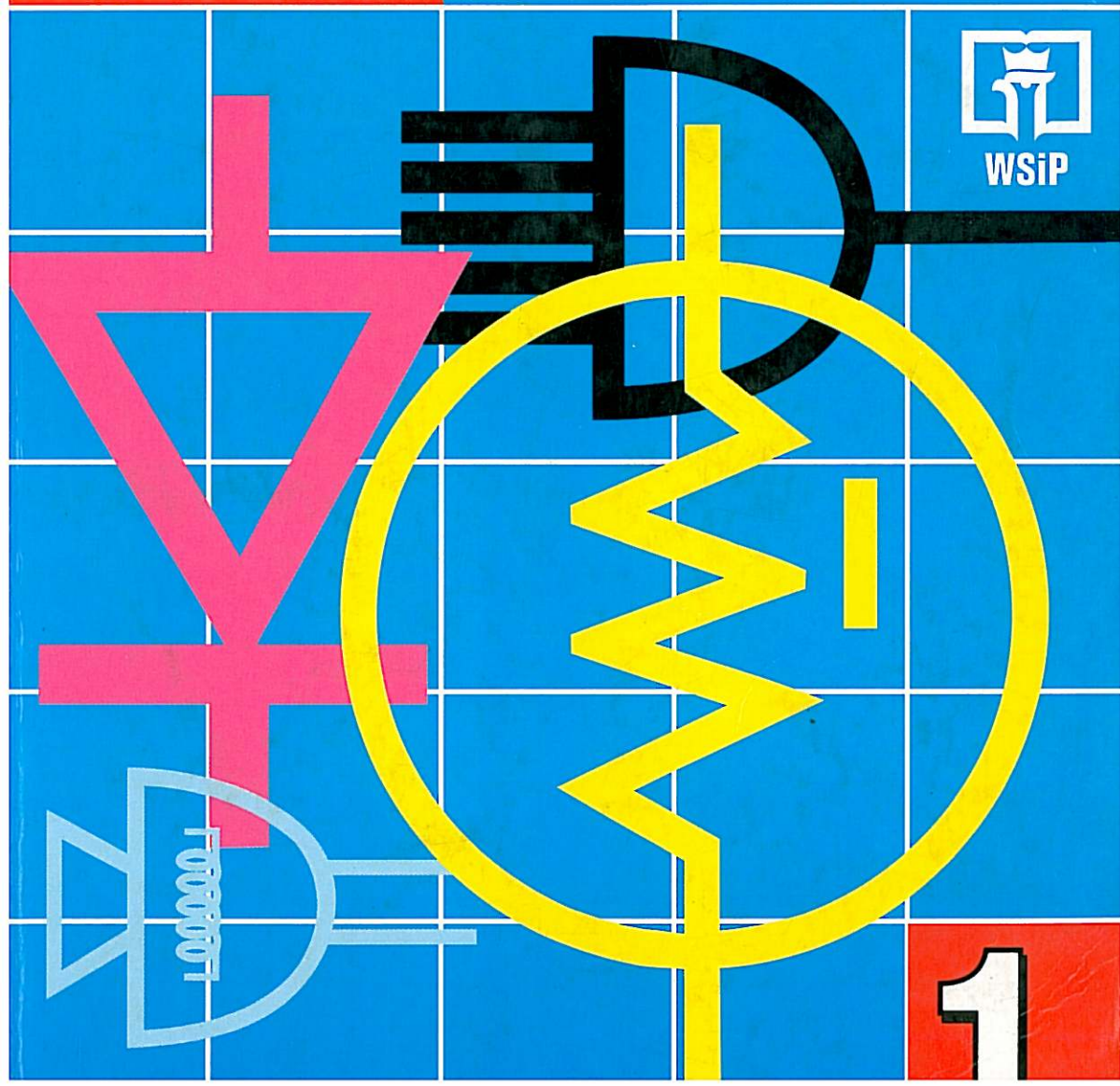


BARBARA PIÓRO
MAREK PIÓRO

PODSTAWY ELEKTRONIKI



BARBARA PIÓRO
MAREK PIÓRO

PODSTAWY ELEKTRONIKI

część 1

PODRĘCZNIK DLA TECHNIKUM

WARSZAWA
WYDAWNICTWA SZKOLNE I PEDAGOGICZNE
SPÓŁKA AKCYJNA



Recenzent: dr inż. Jan Szymczyk — pracownik naukowy Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej
Okładkę projektował: *Krzysztof Demianiuk*
Redaktor: *Małgorzata Marczuk*
Redaktor techniczny: Małgorzata Chmielewska

Książka dopuszczona do użytku szkolnego przez Ministra Edukacji Narodowej i wpisana do zestawu podręczników do nauczania przedmiotu *podstawy elektrotechniki i elektroniki* w zawodzie technik elektronik na poziomie technikum i szkoły policealnej.

Numer w zestawie 1/96

Podręcznik jest zgodny z programem /2105/MPiH/1993.02.15/ nauczania zawodu technik elektronik.

Książka stanowi pierwszą część podręcznika i obejmuje podstawowe wiadomości z zakresu budowy, zasady działania oraz zastosowania przyrządów elektronowych, elementów optoelektronicznych, podzespołów i układów elektronicznych. Podręcznik jest bogato ilustrowany, zawiera również tabele z podstawowymi danymi katalogowymi, oraz słownik angielsko-polski terminów elektronicznych występujących w tekście.

ISBN 83-02-06181-6 cz. 1
ISBN 83-02-05565-4 całość

© Copyright by Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna
Warszawa 1994

Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna
00-950 Warszawa, Pl. Dąbrowskiego 8
Wydanie piąte. Ark. druk. 11,5
Druk i oprawa: Poznańskie Zakłady Graficzne SA
Książkę wydrukowano na papierze produkcji
International Paper — Kwidzyn SA

Spis treści

Wykaz oznaczeń	6
1. Elektroniczne elementy bierne	11
1.1. Rezystory	11
1.1.1. Parametry użytkowe rezystorów stałych	13
1.1.2. Oznaczenia wartości znamionowej rezystorów	14
1.1.3. Rezystory zmienne — potencjometry	15
1.2. Kondensatory	16
1.2.1. Parametry kondensatorów	17
1.2.2. Kondensatory stałe	17
1.2.3. Oznaczenia kondensatorów stałych	19
1.2.4. Kondensatory zmienne	19
1.3. Cewki indukcyjne	20
1.3.1. Rodzaje i parametry cewek	20
1.3.2. Ekranowanie cewek	22
1.3.3. Dławiki	22
2. Podzespoły układów elektronicznych	24
2.1. Przetworniki elektroakustyczne	24
2.1.1. Głośniki	24
2.1.2. Słuchawki	28
2.1.3. Mikrofony	29
2.2. Linia długa	31
2.3. Światłowodowy	33
3. Optyka elektronowa	38
3.1. Podstawowe prawa i pojęcia optyki elektronowej	38
3.2. Soczewki elektronowe	41
3.3. Wyrzutnie elektronowe	42
3.4. Układy odchylające	43
3.5. Luminofory	44
3.6. Lampa oscyloskopowa	45
3.7. Kineskop kolorowy	46
4. Półprzewodniki i zjawiska w nich zachodzące	50
4.1. Co to jest półprzewodnik?	50
4.2. Półprzewodnik samoistny	52
4.3. Półprzewodnik typu N i typu P (niesamoistny)	53
4.4. Co dzieje się z nośnikiem w półprzewodniku?	56
4.5. Zjawiska Halla i Gaussa	59
5. Półprzewodnikowe elementy bierne	61
5.1. Termistory	61
5.2. Warystory	62
5.3. Hallotrony	63
5.4. Gaussotrony	65

6. Złącze PN	66
6.1. Rodzaje złączy	66
6.2. Tworzenie się warstwy zaporowej w złączu PN. Model pasmowy złącza	66
6.3. Polaryzacja złącza	67
6.3.1. Polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia	67
6.3.2. Polaryzacja złącza w kierunku zaporowym	68
6.4. Przebicie złącza	70
6.5. Zjawisko tunelowe	72
6.6. Schemat zastępczy i parametry złącza PN.	73
6.6.1. Pojemności złącza	73
6.6.2. Konduktacja i rezystancja złącza	74
6.7. Przełączanie złącza PN (diody)	75
7. Diody półprzewodnikowe	78
7.1. Diody prostownicze	82
7.2. Diody stabilizacyjne	84
7.3. Diody pojemnościowe	85
7.4. Diody przełączające	87
7.5. Diody detekcyjne i mieszające	88
7.6. Diody generacyjne i wzmacniające	89
7.7. Diody modulacyjne i tłumiące	90
8. Tranzystory bipolarne	91
8.1. Rodzaje tranzystorów	91
8.2. Struktura tranzystora	92
8.3. Praca tranzystora	93
8.3.1. Zasada działania	93
8.3.2. Opis pracy tranzystora metodą ładunkową	94
8.4. Układy pracy tranzystora	95
8.5. Charakterystyki statyczne tranzystora	96
8.5.1. Charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OB	96
8.5.2. Charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OE	97
8.6. Stany pracy i parametry tranzystora	98
8.6.1. Obszar pracy aktywnej	99
8.6.2. Napięcia przebicia	99
8.7. Schematy zastępcze tranzystora	100
8.7.1. Schemat zastępczy typu Π .	100
8.7.2. Schemat zastępczy hybrydowy	102
8.7.3. Schemat zastępczy (model) Ebersa-Molla (stany pracy tranzystora)	103
8.8. Częstotliwości graniczne tranzystora	104
8.9. Przełączanie tranzystora	106
8.10. Podział tranzystorów bipolarnych i ich zastosowanie	108
9. Elektroniczne elementy przełączające	114
9.1. Tranzystor jednozłączowy	115
9.2. Dynistor	116
9.3. Diak	118
9.4. Tyristor	118
9.5. Triak	119
9.6. Parametry i zastosowanie tyrystorów	120

10. Tranzystory polowe (unipolarne — FET)	121
10.1. Tranzystory polowe złączowe (JFET)	122
10.1.1. Zasada działania	122
10.1.2. Charakterystyki i parametry	123
10.1.3. Schemat zastępczy	124
10.2. Tranzystory polowe z izolowaną bramką (IGFET)	125
10.2.1. Zasada działania tranzystora MIS	125
10.2.2. Charakterystyki i parametry tranzystora MIS	126
11. Elementy i podzespoły optoelektroniczne	129
11.1. Dioda elektroluminescencyjna	129
11.1.1. Zasada działania	129
11.1.2. Właściwości optyczne i elektryczne	130
11.2. Fotodetektory	132
11.2.1. Fotorezystor	133
11.2.2. Fotodioda i fotoogniwo	134
11.2.2.1. Właściwości fotoogniwa	135
11.2.2.2. Właściwości fotodiody	137
11.2.3. Fototranzystor	137
11.2.4. Fototyristor	139
11.3. Półprzewodnikowe wskaźniki cyfrowe	139
11.3.1. Rodzaje wskaźników cyfrowych	139
11.3.2. Właściwości wskaźników cyfrowych	140
11.4. Wskaźniki ciekłokrystaliczne (LCD)	141
11.4.1. Podstawowe właściwości wskaźników LCD	141
11.4.2. Wskaźniki LCD z rozproszeniem dynamicznym	143
11.4.3. Wskaźniki LCD z efektem polowym	143
12. Parametry i funkcje układów elektronicznych	146
12.1. Wstęp	146
12.2. Wzmacniacze	149
12.3. Generatory	152
12.4. Układy przemiany częstotliwości	153
12.5. Modulatory	154
12.5.1. Modulator AM	155
12.5.2. Modulatory FM i PM	157
12.6. Demodulatory	158
12.7. Zasada odbioru radiowego	160
12.8. Zasada transmisji telewizyjnej	165
12.8.1. Analiza obrazu i dźwięku	166
12.8.2. Synteza obrazu i dźwięku	168
Słownik angielsko-polski	171
Skorowidz	178
Literatura	185

Wykaz oznaczeń

Alfabet łaciński

a_s, a_w	— promień przewodu linii długiej symetrycznej, promień przewodu linii długiej współosiowej
A	— anoda, powierzchnia wiązki, stała
A_w, A_z	— wewnętrzna, zewnętrzna odległość między zwojami cewki
b	— stała
B	— baza, jaskrawość elektronowa, natężenie pola mag- netycznego
B_z	— indukcja pola magnetycznego
C	— pojemność
C_0	— pojemność własna cewki, pojemność oprawki
C_{cb}, C_{eb}	— pojemność kolektor—baza, pojemność emiter—baza
C_d	— pojemność dyfuzyjna złącza
C_{gs}, C_{gd}	— pojemność bramka—źródło, pojemność bramka— dren
C_j	— pojemność złącza
C_T	— pojemność warstwy zaporowej
C_{Tc}	— pojemność złącza kolektorowego
d	— odstęp między elektrodami, średnica
d_s	— odległość między środkami przewodów w linii długiej symetrycznej
d_w	— promień wewnętrzny przewodu zewnętrznego linii długiej współosiowej
D	— dren
D_B	— współczynnik dyfuzji nośników w bazie
D_n, D_p	— współczynnik dyfuzji par elektron—dziura
D_w, D_z	— wewnętrzna, zewnętrzna średnica cewki
E	— emiter, natężenie pola elektrycznego
E_k, E_p	— energia kinetyczna, energia potencjalna
E_v	— natężenie oświetlenia
f	— częstotliwość
f_0	— częstotliwość rezonansu własnego
f_c	— maksymalna częstotliwość diody pojemnościowej
f_d, f_g, f_s, f_p	— częstotliwość dolna, górna, środkowa, pośrednia
f_h	— częstotliwość heterodyny
f_M	— częstotliwość rezonansu mechanicznego
f_{max}	— maksymalna częstotliwość generacji

f_n, f_{mw}, f_{nf}	— częstotliwość nośna, częstotliwość nośna sygnału wizji, częstotliwość nośna sygnału fonii
f_r	— częstotliwość różnicowa
f_α, f_β	— częstotliwość graniczna tranzystora w układzie OB, częstotliwość graniczna tranzystora w układzie OE
f_T	— częstotliwość graniczna
F	— tor elektronu
F_0	— częstotliwość nośna, składowa stała
F_n	— składowa harmoniczna
ΔF	— dewiacja częstotliwości
ΔF_0	— dewiacja fali nośnej
$g_{b'e}, g_{ce}$	— konduktacja wejściowa, konduktancja wyjściowa tranzystora bipolarnego
g_{gs}, g_{ds}	— konduktancja wejściowa, konduktancja wyjściowa tranzystora polowego
g_m	— transkonduktacja
G	— bramka, konduktancja, upływność jednostkowa, stała
h	— czułość prądowa diody detekcyjnej, odległość
h_{ij}	— elementy macierzy h tranzystora
i	— wartość chwilowa prądu
I	— składowa zmienna prądu, wartość skuteczna
I_0	— maksymalny prąd przewodzenia
I_{CBO}, I_{CEO}	— prąd zerowy kolektora tranzystora w układzie OB, prąd zerowy kolektora tranzystora w układzie OE
I_D, I_{Dsat}	— prąd drenu, prąd nasycenia drenu
I_E, I_B, I_C	— prąd emitera, prąd bazy, prąd kolektora
I_F, I_R	— prąd przewodzenia, prąd wsteczny
I_n, I_p	— prąd dyfuzyjny lub unoszenia dla elektronów, prąd dyfuzyjny lub unoszenia dla dziur
I_p	— prąd fotoelektryczny
I_s	— prąd nasycenia złącza
I_u	— prąd upływowy
I_Z	— prąd stabilizacji (Zenera)
I_{zw}	— prąd zwarcia fotoogniwa
J_e	— natężenie promieniowania
J_x	— gęstość prądu w półprzewodniku
k	— wzmacnienie
k_1	— współczynnik
K	— katoda
l	— długość
l_d	— szerokość warstwy zaporowej
L_n, L_p	— droga dyfuzji (dla elektronów, dla dziur)
L	— indukcyjność

m	— współczynnik głębokości modulacji
M	— współczynnik powielania lawinowego
n	— koncentracja elektronów, współczynnik załamania toru elektronu
n_0	— współczynnik załamania światła w ośrodku otaczającym włókno
n_1, n_2	— współczynnik załamania światła w rdzeniu, współczynnik załamania światła w płaszczu
n_i	— koncentracja samoistna
n_n, n_p	— koncentracja elektronów w półprzewodniku donorowym, koncentracja elektronów w półprzewodniku akceptorowym
N	— typ półprzewodnika
N_o, N_w	— koncentracja nośników na początku, na końcu bazy
N_A, N_D	— koncentracja atomów domieszki akceptorowej, koncentracja atomów domieszki donorowej
p	— koncentracja dziur, ciśnienie akustyczne
p_n, p_p	— koncentracja dziur w półprzewodniku donorowym, koncentracja dziur w półprzewodniku akceptorowym
P	— moc, typ półprzewodnika
P_{tot}	— maksymalna moc strat w diodzie
P_a	— maksymalna moc w tranzystorze
Q	— ładunek
Q_L, Q_c	— dobroć cewki, dobroć diody pojemnościowej
r, R	— rezystancja, promień rdzenia, promień płaszczu
$r_{BB'}$	— rezystancja rozproszona bazy
r_L	— rezystancja uzwojenia cewki
r_s	— rezystancja szeregową
r_Z	— rezystancja dynamiczna
R_B	— promień przesłony
R_D	— rezystancja ciemna
R_E	— rezystancja fotorezystora
R_{II}	— współczynnik Halla
R_L	— rezystancja obciążenia
S	— źródło, czułość widmowa fotoogniwa, powierzchnia
S_e	— strumień energetyczny
t	— czas
t_0	— czas, w jakim prąd kolektora maleje do zera
t_b	— czas przelotu nośników przez bazę
t_d	— czas włączenia diody, czas osiągnięcia stanu aktywnego przez tranzystor
t_n	— czas nasycenia tranzystora
t_{off}	— czas wyłączenia tranzystora

t_{rr}	— czas wyłączenia diody
t_s	— czas przeciągania
T	— okres, temperatura
T_c	— temperatura krytyczna
u	— wartość chwilowa napięcia
U	— składowa zmienna napięcia, wartość skuteczna
U_1, U_2	— napięcie wejściowe, napięcie wyjściowe, powierzchnie ekwipotencjalne
U_{BCP}, U_{BEP}	— napięcie przewodzenia złącza kolektorowego, napięcie przewodzenia złącza emiterowego
U_{BE}, U_{CE}, U_{CB}	— napięcie baza—emiter, napięcie kolektor—emiter, napięcie kolektor—baza
$U_{CBO\max}, U_{CEO\max}$	— maksymalne napięcie kolektor—baza tranzystora w układzie OB, maksymalne napięcie kolektor—emiter tranzystora w układzie OE
U_{CES}	— napięcie nasycenia tranzystora bipolarnego
U_D	— napięcie dyfuzyjne złącza
$U_{DS\text{sat}}$	— napięcie nasycenia dren—źródło
U_F, U_R	— napięcie przewodzenia, napięcie zaporowe
U_{GS}, U_{DS}	— napięcie bramka—źródło, napięcie dren—źródło
$U_{GS\text{off}}, U_p$	— napięcie odcięcia kanału tranzystora polowego
U_m	— amplituda sygnału użytecznego
U_n	— amplituda sygnału nośnego
U_P	— fotoelektryczna siła elektromotoryczna
U_{PM}	— napięcie sygnału zmodulowanego fazowo
U_{RWM}	— szczytowe napięcie wsteczne
U_T	— napięcie progowe
U_Z	— napięcie stabilizacji (Zenera)
w	— długość
w_b	— szerokość bazy
W_A	— energia poziomu akceptorowego
W_C	— dno pasma przewodnictwa
W_D	— energia poziomu donorowego
W_F	— poziom Fermiego
W_g	— szerokość pasma zabronionego w półprzewodniku
W_i	— poziom samoistny
W_{pr}	— energia wyjścia elektronu z półprzewodnika
W_V	— wierzchołek pasma podstawowego
v	— prędkość elektronu
V	— potencjał
V_B, V_C, V_E	— potencjał na bazie, potencjał na kolektorze, potencjał na emiterze
Z	— impedancja
Z_c	— impedancja falowa

Alfabet grecki

α	— kąt padania, współczynnik tłumienia, współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora w układzie OB
α_C	— temperaturowy współczynnik pojemności
α_T	— temperaturowy współczynnik rezystancji
α_{U_z}	— temperaturowy współczynnik napięcia stabilizacji
β	— kąt załamania, współczynnik przesunięcia, współczynnik nieliniowości, współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora w układzie OE
β_I, β_N	— współczynnik wzmocnienia prądowego w kierunku inwersyjnym, w kierunku normalnym
γ	— współczynnik przenoszenia
γ_0	— maksymalny kąt emisji elektronów
Δ	— przyrost
δ	— kąt stratności
ϵ_r	— przenikalność dielektryczna ośrodka
η	— sprawność energetyczna, wewnętrzny współczynnik blokowania, sprawność detekcji
λ	— długość fali
$\Delta\lambda$	— szerokość połówkowa
μ	— ruchliwość nośników
ρ	— rezystywność
σ	— konduktywność
τ	— czas życia nośników, kąt
Θ_B, Θ_1	— kąt skręcenia obrazu
φ	— kąt krytyczny, kąt Halla
ω	— pulsacja, kąt bryłowy
ω_m	— pulsacja sygnału użytecznego
ω_T	— pulsacja graniczna
ψ_g	— kąt graniczny
ψ_n	— faza początkowa, faza fali nośnej
$\Delta\psi$	— dewiacja fazy

Stałe fizyczne

$c = 2,998 \times 10^8$ m/s	— prędkość światła w próżni
$e = 1,602 \times 10^{-19}$ C	— ładunek elektronu
$eV = 1,602 \times 10^{-19}$ J	— elektronowolt (jednostka)
$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m	— przenikalność dielektryczna próżni
$h = 6,626 \times 10^{-34}$ J·s	— stała Plancka
$k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K $8,62 \times 10^{-5}$ eV/K	— stała Boltzmanna
$m = 9,106 \times 10^{-31}$ kg	— masa spoczynkowa
$q = 1,6 \times 10^{-19}$ C	— ładunek jednostkowy

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Matematyka:

- Pojęcie funkcji liniowej, logarytmicznej i wykładniczej.

Fizyka:

- Zależność wartości rezystancji od parametrów przewodnika i od temperatury.
- Jednostkę rezystancji i jej pochodne.
- Właściwości dielektryków.
- Co to jest przenikalność.
- Obliczanie pojemności kondensatora płaskiego.
- Jednostkę pojemności i jej pochodne.
- Definicję indukcyjności, jednostkę i jej pochodne.
- Właściwości pola elektromagnetycznego.

Elektrotechnika:

- Obliczanie rezystancji wypadkowej (zastępczej) układu rezystorów.
- Moc wydzielaną w rezystorze.
- Obliczanie pojemności wypadkowej układu kondensatorów.
- Co to jest reaktancja i jakim wyraża się wzorem.
- Zależność indukcyjności cewki od materiału rdzenia.

1. Elektroniczne elementy bierne

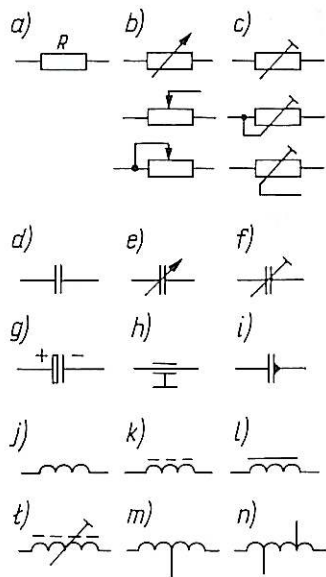
Przez pojęcie elementu biernego rozumiemy: **rezystory, kondensatory i elementy indukcyjne**. Elementy tego samego rodzaju (np. rezystory) mają wspólną właściwość podstawową, różne natomiast właściwości drugorzędne. Są one wykonane z różnych materiałów i w różny sposób; w związku z tym mają inne zastosowania i nazwy oraz symbole graficzne (rys. 1.1).

1.1. Rezystory

Rezystory dzielimy (rys. 1.2) w zależności od:

- cech funkcjonalnych, na: rezystory, potencjometry, termistory, warystory i magnetorezystory-gausotrony;
- charakterystyki prądowo-napięciowej, na: liniowe i nieliniowe;
- stosowanego materiału oporowego, na: drutowe i niedrutowe.

Rezystory liniowe dzielimy na stałe i zmienne. W **rezystorach zmiennych** można zmieniać wartość rezystancji (rezystory nastawne lub regulacyjne) lub stosunek podziału rezystancji (potencjometry).



Rys. 1.1 Symbole

— rezystorów: a) stały; b) zmienny (potencjometr); c) nastawny;

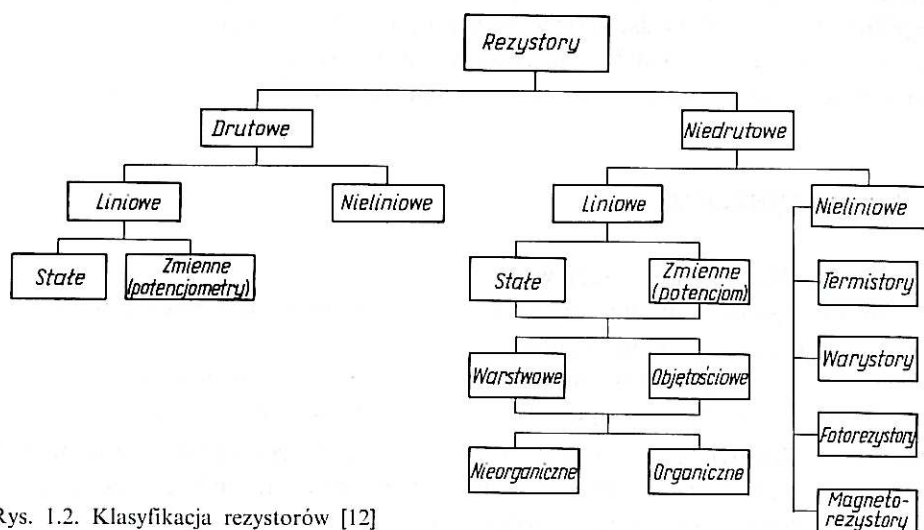
— kondensatorów: d) stały; e) zmienny; f) trymer; g) elektrolityczny; h) przelotowy; i) z oznaczoną elektrodą zewnętrzną;

— cewek indukcyjnych: j) bez rdzenia; k) z rdzeniem ferrytowym; l) z rdzeniem stalowym; m) dostrojca; n) z odczepami [7]

Rezystory drutowe (symbol: RDL) są wykonane z drutu stopowego (*manganin, konstantan, kanthal, nikielina*) nawiniętego na ceramiczny wałek lub rurkę w postaci jednowarstwowego uzwojenia.

Rezystory niedrutowe są wykonane z materiału rezystywnego jako rezystory warstwowe lub objętościowe.

W **rezystorach warstwowych** (symbol: MŁT, AF, ML, RMG, AT), materiał rezystywny jest umieszczony na podłożu w postaci warstwy. Rezystory te mogą być węglowe (symbol: OWZ) i metalizowane. W zależności od grubości warstwy, rozróżniamy rezystory **ciенокwarstwowe** (o grubości warstwy poniżej 1 μm) i **grubowarstwowe** (o grubości warstwy powyżej 1 μm).



Rys. 1.2. Klasyfikacja rezystorów [12]

W rezystorach metalizowanych (są to rezystory cienkowarstwowe) materiałem oporowym jest *złoto, platyna, rod, pallad, nikiel, iryd*. Dotychczas najczęściej stosowano stopy NiCr (nikiel z chromem, tzw. *nichrom*).

Rezystory warstwowe **węglowe** stosuje się w układach bardzo wielkich częstotliwości (do 1 GHz). Dopuszczalna moc wydzielana w tych rezystorach wynosi od 0,05 do 1 W; mają one duży poziom szumów własnych oraz duży współczynnik temperaturowy rezystancji ($2 \times 10^{-4} \div 6 \times 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$).

Oprócz rezystorów warstwowych wykonuje się również **rezystory objętościowe**, w których prąd płynie całą objętością rezystora. Do ich budowy stosuje się organiczne lub nieorganiczne materiały oporowe. Są one głównie stosowane w sprzęcie profesjonalnym, gdzie wytrzymują duże obciążenia prądowe i mocy. Rezystory te mają moc od 5 do 20 W i rezystancję od 24Ω do $1 \text{ M}\Omega$.

Rezystor liniowy w normalnych warunkach pracy charakteryzuje się proporcjonalną zależnością napięcia od prądu, tzn. spełnia prawo Ohma w postaci $U = R \times I$, przy czym $R = \text{const}$. Dla **rezystorów nieliniowych** wartość rezystancji jest funkcją prądu lub napięcia.

Rezystory są produkowane w następujących grupach tolerancji: ± 20 , ± 10 , ± 5 , ± 2 i $\pm 1\%$ ($\pm 0,5\%$). Rezystory o tolerancjach $\pm 2\%$ i $\pm 1\%$ charakteryzują się dużą stałością rezystancji i są nazywane rezystorami dokładnymi.

Tabela 1.1

Ciąg wartości rezystancji w szeregu E 24 [12]

Ciąg E24 $\pm 5\%$
10
11
12
13
15
16
18
20
22
24
27
30
33
36
39
43
47
51
56
62
68
75
82
91

1.1.1. Parametry użytkowe rezystorów stałych

Do podstawowych parametrów rezystorów należą:

- **rezystancja znamionowa** (wartość rezystancji podawana na obudowie elementu). W przypadku rezystorów drutowych wynosi ona $0,51 \Omega \div 10 \text{ k}\Omega$, rezystorów warstwowych — $10 \Omega \div 1 \text{ k}\Omega$, a dla rezystorów węglowych — $10 \Omega \div 1 \text{ M}\Omega$;
- **tolerancja** (dokładność, z jaką są wykonywane rezystory o danej wartości rezystancji znamionowej). Klasom dokładności odpowiadają szeregi (ciągi) wartości rezystancji znamionowych. Są to: E6 ($\pm 20\%$), E12 ($\pm 10\%$), E24 ($\pm 5\%$) — tab. 1.1, E48 ($\pm 2\%$), E96 ($\pm 1\%$), E192 ($\pm 0,5\%$);

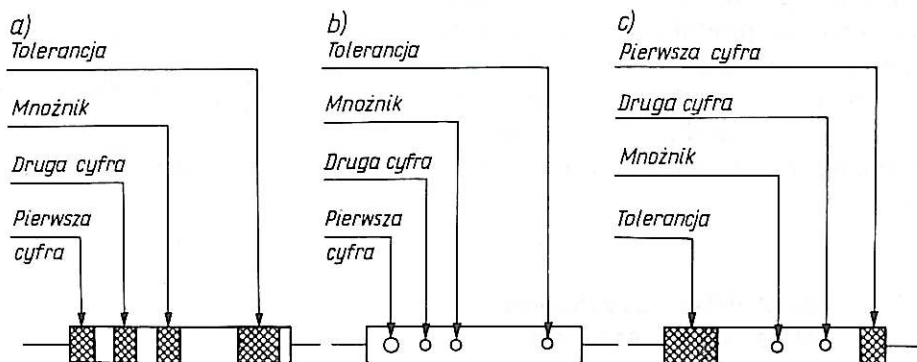
- **moc znamionowa** (największa dopuszczalna moc wydzielana w rezystorze, której wartość zależy od jego konstrukcji, zastosowanego materiału, a także od sposobu chłodzenia rezystora).

1.1.2. Oznaczenia wartości znamionowej rezystorów

Istnieją dwa sposoby oznaczania wartości znamionowej rezystorów:

- 1) kod barwny,
- 2) kod literowo-cyfrowy.

Stosując kod barwny, wartość znamionową oznacza się za pomocą barwnych pasków, kropek lub ich kombinacji (rys. 1.3). Pierwszy pasek (kropka), umieszczony bliżej czoła rezystora, określa pierwszą cyfrę, drugi pasek (kropka) — drugą cyfrę, trzeci pasek (kropka) — współczynnik krotności (mnożnik). Natomiast ostatni pasek oznacza tolerancję i jest podwójnej szerokości. Kod barwny rezystorów przedstawiono w tab. 1.2. Jeżeli np.: na rezystorze będą



Rys. 1.3. Kod barwny rezystorów: a) paski; b) kropki; c) mieszany [12]

Tabela 1.2

Kod barwny rezystorów [12]

Kolor znaku	Pierwszy pasek pierwsza cyfra	Drugi pasek druga cyfra	Trzeci pasek współczynnik krotności	Czwarty pasek tolerancja rezystancji %
Srebrny	—	—	10^{-2}	10
Złoty	—	—	10^{-1}	5
Czarny	—	0	1	—
Brązowy	1	1	10	1
Czerwony	2	2	10^2	2
Pomarańczowy	3	3	10^3	—
Żółty	4	4	10^4	—
Zielony	5	5	10^5	—
Niebieski	6	6	10^6	—
Fioletowy	7	7	—	—
Szary	8	8	—	—
Biały	9	9	—	—

paski: żółty, fioletowy, czerwony, złoty, to oznacza, że ma on wartość znamionową $4,7 \text{ k}\Omega$ i tolerancję $\pm 5\%$.

W kodzie literowo-cyfrowym wartość rezystancji określa się zwykle czterema znakami, np.: wartość 81Ω — cyfrą 81, 8100Ω — cyfrą 8100 lub znakiem 8k1, a wartość 7200000Ω — znakiem 7M2.

1.1.3. Rezystory zmienne — potencjometry

W układach elektronicznych oprócz rezystorów stałych stosuje się **rezystory zmienne** zwane **potencjomentrami**, w których wartość rezystancji zależy do położenia pokrętki (ruchomego ślizgacza). W zależności od zastosowania, potencjometry różnią się: rozmiarami, rodzajem ślizgacza, obudową oraz wyprowadzeniami.

Ruch ślizgacza, zależnie od kąta jego obrotu (położenia) na osi, powoduje zmianę rezystancji, która może mieć charakter liniowy, wykładniczy lub logarytmiczny. **Potencjometry o charakterystyce liniowej** najczęściej stosuje się do regulacji napięcia (dzielniki napięciowe), **o charakterystyce logarytmicznej** — do regulacji siły głosu we wzmacniaczach akustycznych, a **o charakterystyce wykładniczej** — do regulacji barwy tonu.

Potencjometry mogą być drutowe i niedrutowe (warstwowe: węglowe lub cermetowe). Rodzaje potencjometrów i ich typowe zastosowania przedstawiono w tab. 1.3.

Tabela 1.3

Rodzaje potencjometrów i ich zastosowanie

Rodzaj potencjometru	Zastosowanie
potencjometr potencjometr nastawny potencjometr pojedynczy potencjometr podwójny potencjometr sprzężony	w układach do częstej regulacji w układach niewymagających częstej regulacji reguluje jeden obwód dwa potencjometry regulują dwa obwody jeden potencjometr reguluje dwa obwody

Potencjometry drutowe są najbardziej stabilne ze wszystkich rezystorów. Stosuje się je jako potencjometry dostrojcze i wieloobrotowe w układach pomiarowo-kontrolnych. Wykonuje się je o mocy $0,5 \div 4 \text{ W}$. **Potencjometry warstwowe** natomiast są stosowane do regulacji napięć w obwodach, a moc jaka może się w nich wydzielać wynosi od $0,1$ do 2 W .

Pytania kontrolne:

1. Jakie rezystory można stosować w układzie wzmacniającym sygnał o częstotliwości 100 MHz ?
2. Które rezystory można uznać za niskoszumowe?
3. Jakie są najważniejsze parametry użytkowe rezystorów?
4. Jakie są wartości znamionowe rezystorów z ciągu E24, a jakie z E12?

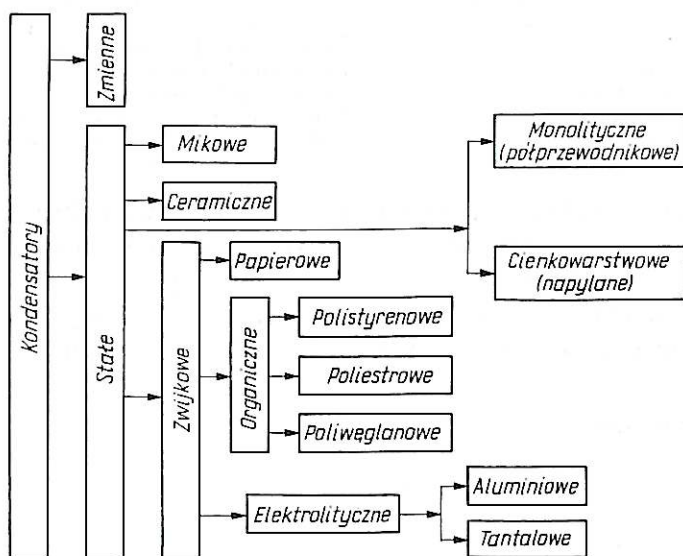
5. Jaki kod barwny będzie miał rezystor ciągu E24 o wartości znamionowej:
a) 5,6 k Ω ; b) 91 Ω ; c) 1,2 M Ω ?
6. Jaką wartość znamionową ma rezystor, którego kod paskowy jest następujący:
a) fioletowy, zielony, pomarańczowy, złoty?
b) złoty, żółty, szary, czarny?
c) biały, brązowy, niebieski, srebrny?
7. W jaki sposób oznacza się tolerancję rezystorów?
8. Czym różni się potencjometr od rezystora?
9. Gdzie stosuje się potencjometry drutowe, a gdzie warstwowe?
10. Czy rezystor o rezystancji znamionowej 1 k Ω i mocy dopuszczalnej 0,5 W możemy zastąpić szeregowym połączeniem dwóch rezystorów o rezystancji znamionowej 500 Ω i mocy dopuszczalnej:
a) 0,5 W; b) 0,25 W; c) 1 W?

1.2. Kondensatory

Kondensator stanowi układ dwóch lub więcej przewodników (okładzin), odizolowanych warstwą dielektryka, gromadzący energię pola elektrycznego.

Kondensatory można podzielić, w zależności od zastosowanego dielektryka (rys. 1.4) oraz od ich przeznaczenia, na:

- **stałonapięciowe** (w obwodach napięcia stałego);
- **zmiennonapięciowe**;
- **impulsowe** (w obwodach impulsowych o większych wartościach prądu ładowania i rozładowania);



Rys. 1.4. Podział kondensatorów [7]

- **biegunowe** zwane polarnymi (pracują przy jednym określonym kierunku doprowadzonego napięcia stałego);
- **niebiegunowe** zwane bipolarnymi (w obwodach napięcia stałego, przy dowolnej jego biegunowości);
- **o zmiennej pojemności** (do przestrajania obwodów rezonansowych).

1.2.1. Parametry kondensatorów

Najważniejszymi parametrami kondensatora są:

- **pojemność znamionowa** — C_N (wyrażana w faradach (F), określa zdolność kondensatora do gromadzenia ładunków elektrycznych; podawana na obudowie kondensatora — ciąg wartości z szeregu E6 lub E12);
- **napięcie znamionowe** — U_N (największe dopuszczalne napięcie stałe lub zmienne, które może być przyłożone do kondensatora);
- **tangens kąta stratności** — $\operatorname{tg} \delta$ (stosunek mocy czynnej wydzielającej się w kondensatorze do mocy biernej magazynowanej w kondensatorze, przy napięciu sinusoidalnie zmiennym o określonej częstotliwości);
- **prąd upływowy** — I_u (prąd płynący przez kondensator, przy doprowadzonym napięciu stałym);
- **temperaturowy współczynnik pojemności** — α_C (określa względną zmianę pojemności, zależną od zmian temperatury).

1.2.2. Kondensatory stałe

Podstawowe parametry kondensatora (pojemność znamionowa i napięcie znamionowe) zależą przede wszystkim od rodzaju zastosowanego w nich dielektryka (patrz tab. 1.4). W związku z tym kondensatory dzielimy na: mikowe (symbol KM), ceramiczne (symbol: KCP, KFP, KCR, KFR), papierowe (symbol: KLMP, KSMP), z tworzyw sztucznych (organiczne — symbol: KSF, MKSE, MKSF, MKSP), elektrolityczne (symbol: KEN, KEO, SM, E, T, UL, KERMS) oraz powietrzne.

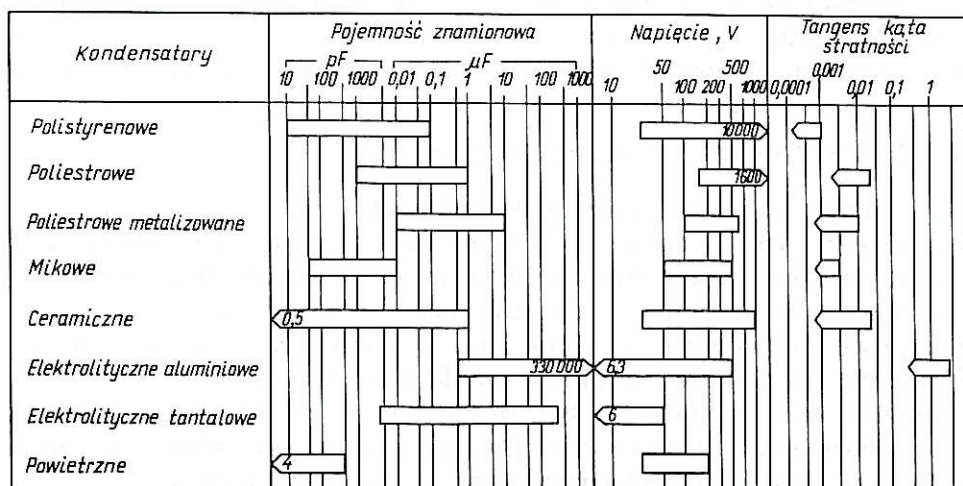
Do budowy **kondensatorów mikowych** używa się *muskowitu* (odmiana miki). Kondensatory te mają mały temperaturowy współczynnik pojemności i mały tangens kąta stratności dielektrycznej. Wadą jest wysoka cena kondensatorów o większych wartościach pojemności.

Kondensatory ceramiczne są wykonywane z *ceramiki alundowej*, *rutylowej* oraz *steatytowej*. Mają one małą wartość tangensa kąta stratności oraz duży temperaturowy współczynnik pojemności. Zaletą ich jest duża wartość pojemności znamionowej i małe wymiary. Mają niewielkie wartości indukcyjności własnej, w związku z tym mogą być stosowane w obwodach wielkiej częstotliwości oraz jako pojemności sprzęgające (pojemności w obwodach rezonansowych i filtrach).

Kondensatory papierowe mają małe wymiary przy dużych wartościach pojemności oraz duży współczynnik stratności dielektrycznej. W konden-

Tabela 1.4

Podstawowe parametry kondensatorów w zależności od zastosowanego dielektryka



satorach tych dielektrykiem jest bibuła nasycona olejem syntetycznym, kondensatorowym lub parafinowym.

W kondensatorach z tworzyw sztucznych, dielektrykiem mogą być: folia polistyrenowa, poliestrowa lub polipropylenowa. **Kondensatory polistyrenowe** mają mały współczynnik temperaturowy pojemności oraz mały tangens kąta stratności. Są one stosowane w układach pracujących w zakresie wielkich częstotliwości. **Kondensatory poliestrowe** mają duży współczynnik tangensa kąta stratności dielektrycznej. Są stosowane głównie w układach napięcia stałego lub zmiennego o małej częstotliwości. **Kondensatory polipropylenowe** mają właściwości zbliżone do właściwości kondensatorów poliestrowych. Stosuje się je w obwodach prądu zmiennego o częstotliwości 50 Hz.

Kondensatory elektrolityczne, ze względu na użyty do ich budowy materiał, dzielimy na: **aluminiowe** i **tantalowe** (z elektrolitem ciekłym — mokre, z elektrolitem suchym — półprzewodnikowe). Pod względem zastosowań układowych rozróżniamy kondensatory: biegunowe i niebiegunowe, stosowane w układach filtracji napięcia zasilania i jako kondensatory sprzęgające w układach małej częstotliwości. Kondensatory elektrolityczne mają duże wartości pojemności znamionowej. Długotrwała praca kondensatora przy napięciu mniejszym niż napięcie znamionowe powoduje znaczny wzrost jego pojemności. Wadą tych kondensatorów jest duży prąd upływowy, którego wartość rośnie ze wzrostem temperatury. Kondensatory elektrolityczne mają oznaczoną biegunowość. Zmiana biegunów (elektrod) powoduje zniszczenie kondensatora.

1.2.3. Oznaczenia kondensatorów stałych

Kondensatory, tak jak i rezystory, mogą być oznaczone cyfrowo, literowo-cyfrowo lub za pomocą kodu barwnego (głównie kondensatory miniaturowe). W **oznaczeniu cyfrowym** podaje się najczęściej wartości znamionowe pojemności i napięcia oraz tolerancję.

Natomiast w **oznaczeniach literowo-cyfrowych**, litery oznaczają rodzaj dielektryka kondensatora (pierwszą literą jest **K** — kondensator, drugą literą może być: **P** — papierowy, **M** — mikowy, **S** — tworzywo sztuczne, którego rodzaj określa trzecia litera: **P** — polistyren, **E** — poliester, **W** — poliwęglan, **P** — polipropylen), a cyfry — rodzaj konstrukcji.

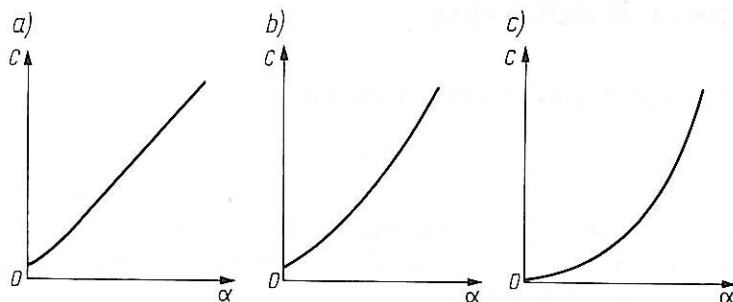
W **kodzie barwnym** pierwszy pasek oznacza pierwszą cyfrę wartości pojemności, drugi — drugą cyfrę wartości pojemności, trzeci — mnożnik dziesiętny, czwarty — tolerancję wyrażoną w %, piąty — temperaturowy współczynnik pojemności, szósty — napięcie znamionowe.

1.2.4. Kondensatory zmienne

Kondensatory o zmiennej pojemności są to kondensatory z dielektrykiem powietrznym (symbol: AM, FM) lub kondensatory ceramiczne dostrójcze zwane **trymerami** (symbol TCP). **Kondensator powietrzny jest zbudowany z dwu zespołów równoległych płytek (rotor i stator), które zmieniając swe położenie powodują zmianę wartości pojemności kondensatora.** Charakter zmian pojemności kondensatora zależy natomiast od kształtu płytek rotora i statora.

Ze względu na charakter zmian wartości pojemności, w zależności od kąta obrotu rotora, rozróżniamy kondensatory o:

- **prostoliniowej zmianie pojemności** (stosowane jako kondensatory dostrójcze);
- **prostoliniowej zmianie długości fali** (stosowane w aparaturze wyskalowanej w jednostkach długości fali);



Rys. 1.5. Charakterystyki kondensatorów zmiennych: a) o prostoliniowej zmianie pojemności; b) o prostoliniowej zmianie długości fali w obwodzie rezonansowym; c) o prostoliniowej zmianie częstotliwości w obwodzie rezonansowym [12]

- **prostoliniowej zmianie częstotliwości** (używane w aparaturze, w której jest pożądana podziałka o równomiernej skali częstotliwościowej, np. w odbiornikach radiowych i generatorach pomiarowych);
- **logarytmicznej zmianie pojemności** (stosowane w nadajnikach, odbiornikach oraz w aparaturze pomiarowej).

Charakterystyki pojemności w funkcji kąta obrotu rotora przedstawiono na rys. 1.5. Kondensatory obrotowe mają pojemności mniejsze niż 500 pF, natomiast kondensatory nastawne, zwane trymerami, mają pojemności mniejsze niż 100 pF.

Pytania kontrolne:

1. Jakie typy kondensatorów stosuje się w obwodach rezonansowych?
2. Od czego zależy wartość pojemności kondensatora?
3. Jakie kondensatory stosujemy w zakresie dużych częstotliwości pracy?
4. W jaki sposób oznaczamy kondensatory?
5. Czym różni się kondensator elektrolityczny od kondensatora wykonanego z tworzywa sztucznego?
6. Jaki charakter mogą mieć zmiany wartości pojemności kondensatorów zmiennych? Gdzie się stosuje ten typ kondensatorów?
7. Co to jest trymer?
8. Jaki typ kondensatora może mieć następujące parametry:
 - a) $C = 0,1 \text{ pF}$, $U = 150 \text{ V}$, $\text{tg } \delta = 1,5 \times 10^{-2}$?
 - b) $C = 2 \text{ pF}$, $U = 50 \text{ V}$, $\text{tg } \delta = 1 \times 10^{-3}$?
 - c) $C = 10 \text{ nF}$, $U = 500 \text{ V}$, $\text{tg } \delta = 5 \times 10^{-3}$?
 - d) $C = 100 \text{ }\mu\text{F}$, $U = 20 \text{ V}$, $\text{tg } \delta = 0,5$?
9. Jeżeli kondensator o pojemności 2 nF i napięciu znamionowym 1 kV zastąpimy dwoma równolegle połączonymi kondensatorami o jednakowej pojemności, to powinny one mieć następujące parametry:
 - a) $C = 1 \text{ nF}$, $U = 1000 \text{ V}$;
 - b) $C = 2 \text{ nF}$, $U = 750 \text{ V}$;
 - c) $C = 4 \text{ nF}$, $U = 500 \text{ V}$.

1.3. Cewki indukcyjne

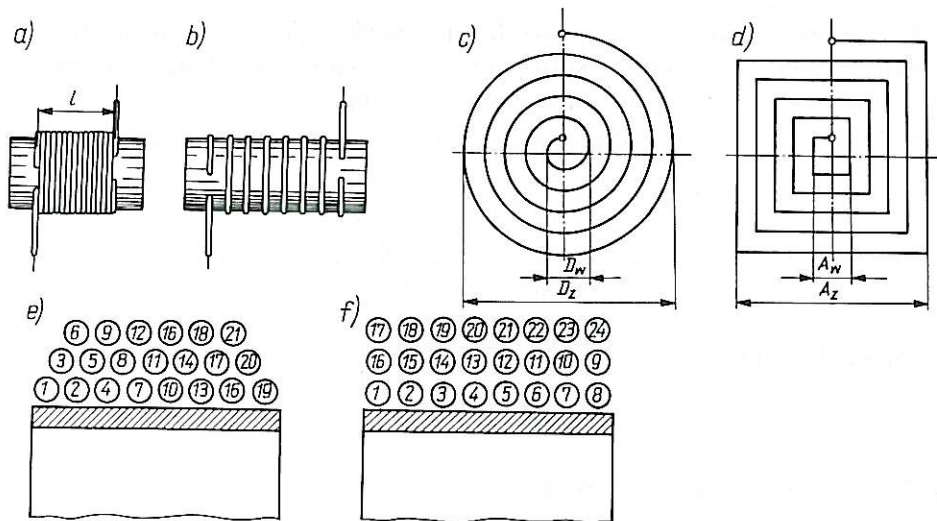
1.3.1. Rodzaje i parametry cewek

Cewka indukcyjna, będąca dwójnikiem elektrycznym w postaci zwojnicy, składa się z uzwojenia, korpusu oraz rdzenia (magnetowodu).

Ze względu na sposób wykonania, cewki dzielimy na:

- **jednowarstwowe** (rys. 1.6a, b, c, d) lub **wielowarstwowe** (rys. 1.6e, f);
- **bezdzeniowe** lub **z rdzeniem**;
- **cyldryczne, płaskie, toroidalne** lub **drukowane**;
- **ekranowane** lub **nieekranowane**.

Cewki jednowarstwowe mają wartości indukcyjności od 15 do 20 μH .



Rys. 1.6. Sposoby uzwojania cewek: a) cylindryczna o uzwojeniu ścisłym; b) cylindryczna o uzwojeniu skokowym; c) płaska o uzwojeniu spiralnym; d) płaska o uzwojeniu kwadratowym; e), f) cewki wielowarstwowe [12]
 D_w — średnica wewnętrzna, D_z — średnica zewnętrzna, A_w — wewnętrzna odległość między zwojami, A_z — zewnętrzna odległość między zwojami

Mogą być one wykonywane jako cylindryczne (rys. 1.6a i b) lub płaskie: spiralne (rys. 1.6c) lub kwadratowe (rys. 1.6d) o maksymalnej wartości indukcyjności poniżej $0,1 \mu\text{H}$. Cewki wielowarstwowe mają duże wartości indukcyjności ($200 \div 500 \mu\text{H}$); ich uzwojenie może być równomierne (rys. 1.6e, f) lub chaotyczne.

Układ odpowiednio wyprofilowanych ścieżek na płycie drukowanej, może również stanowić element indukcyjny (w układach scalonych i obwodach drukowanych).

Cewki są stosowane w obwodach rezonansowych, filtrach, jako elementy sprzęgające oraz jako dławiki w układach wielkiej lub małej częstotliwości.

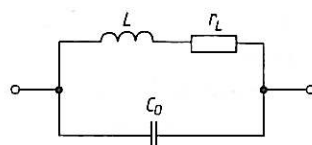
Podstawowymi parametrami cewki (jej schemat zastępczy pokazano na rys. 1.7) są:

- indukcyjność własna — L ;
- dobroć — Q_L (zależy od częstotliwości pracy i rezystancji uzwojenia), określona wzorem

$$Q_L = \frac{\omega L}{r_L}$$

w którym: $\omega = 2\pi f$ — pulsacja, f — częstotliwość pracy cewki, L — indukcyjność, r_L — rezystancja uzwojenia.

Wartość dobroci wynosi od 30 do 200;



1.7. Schemat zastępczy cewki rzeczywistej [12]
 L — indukcyjność cewki, r_L — rezystancja cewki, C_0 — pojemność własna cewki

- **pojemność własna** — C_0 (występuje między poszczególnymi zwojami cewki, między zwojami a korpusem oraz innymi elementami otaczającymi cewkę) zależy od wymiarów i sposobu uzwojenia.

Od wartości pojemności własnej cewki (w granicach od 0,5 do 50 pF) zależy częstotliwość rezonansu własnego $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$. Podczas zwiększania czę-

stotliwości pracy, najpierw występuje zjawisko rezonansu (gdy $\omega^2 LC_0 = 1$), a następnie zaznacza się pojemnościowy charakter cewki.

W technice wielkich częstotliwości (częstotliwości rzędu GHz) przewód o długości 1 cm może być uważany za indukcyjność (patrz linia długa — rozdz. 2.2).

1.3.2. Ekranowanie cewek

Prąd przepływający przez cewkę wytwarza w niej pole elektromagnetyczne, które ma wpływ na działanie elementów znajdujących się w jej pobliżu. W celu zmniejszenia wpływu tego pola, cewki umieszcza się w **ekranach metalowych** lub (i) w odpowiedniej odległości od innych elementów. Ekran chroni też cewkę przed zakłócającym wpływem zewnętrznych pól elektromagnetycznych. Indukcyjność własna cewki ekranowanej zmniejsza się, a jej pojemność własna wzrasta. Zmiany parametrów cewki są tym większe, im odległość ekranu od uzwojenia jest mniejsza. Ekran wykonuje się z *blachy aluminiowej, miedzianej lub mosiężnej* o różnej grubości. Grubość ekranu musi być tym większa, im jest mniejsza częstotliwość pracy cewki. Ekranuje się cewki o dużych wymiarach — średnica większa niż $15 \div 25$ mm, natomiast cewki o średnicy $4 \div 5$ mm, oddalone od innych elementów na odległość równą $4 \div 5$ -krotnej średnicy nie są ekranowane, gdyż ich wpływ na pracę elementów znajdujących się w ich otoczeniu jest pomijalny.

Cewki są stosowane w układach do eliminacji napięć przemiennych, rozdzielania napięcia stałego od zmiennego, w układach oscylacyjnych, w filtrach do sprzęgania stopni wzmacniaczy.

1.3.3. Dławiki

Dławik jest to cewka z rdzeniem ferromagnetycznym o nieliniowej charakterystyce magnesowania rdzenia. Jest to element o dużej indukcyjności własnej, którego zadaniem jest eliminowanie lub tłumienie składowej zmiennej sygnału w obwodzie. Zwykle współpracuje on z kondensatorami, tworząc filtry dolnoprzepustowe. W zależności od częstotliwości pracy, wyróżniamy **dławiki małej i wielkiej częstotliwości**.

Dławiki wykonuje się z cieńszego drutu niż cewki indukcyjne (ich średnica wynosi od 0,05 do 0,1 mm), gdyż ich rezystancja odgrywa drugorzędną rolę.

Pytania kontrolne:

1. Dlaczego cewki o identycznych wartościach indukcyjności, lecz przeznaczone do pracy przy innych częstotliwościach, są wykonywane w różny sposób?
2. Które parametry decydują o częstotliwości pracy cewki?
3. W jaki sposób można zwiększyć, a w jaki zmniejszyć (czy jest to możliwe) indukcyjność cewki powietrznej?
4. Dlaczego stosuje się ekranowanie cewek?
5. Czy cewkę o średnicy 20 mm powinno się ekranować? Jeśli tak, to uzasadnij dlaczego i podaj przykład ekranu.
6. Oblicz częstotliwość rezonansu własnego cewki o następujących parametrach:
 - a) $C_0 = 100 \text{ pF}$, $L = 116 \text{ } \mu\text{H}$;
 - b) $C_0 = 50 \text{ pF}$, $L = 4 \text{ } \mu\text{H}$;
 - c) $C_0 = 2150 \text{ pF}$, $L = 54 \text{ } \mu\text{H}$;
7. Czy element o parametrach: $L = 100 \text{ } \mu\text{H}$ i $R = 3 \text{ } \Omega$ należy uznać za dławik czy cewkę (częstotliwość pracy $f = 10 \text{ kHz}$)?

PRZYPOMNIJ SOBIE!

Fizyka:

- Prawa optyki (odbicie i załamanie światła).
- Zjawisko piezoelektryczne.
- Zależność długości fali od częstotliwości.

Miernictwo:

- Działanie przetwornika magnetoelektrycznego.

2. Podzespoły układów elektronicznych

2.1. Przetworniki elektroakustyczne

Przetworniki elektroakustyczne są to elementy przetwarzające przebiegi akustyczne w przebiegi elektryczne (mikrofon) lub odwrotnie (głośnik, słuchawki).

Ze względu na sposób przetwarzania, przetworniki elektroakustyczne można podzielić na:

- **piezoelektryczne** (krystaliczne);
- **dynamiczne** (magnetoelektryczne);
- **pojemnościowe** (elektrostatyczne);
- **węglowe** (tylko mikrofony);
- **elektromagnetyczne**.

Poziom natężenia dźwięku wyraża się w decybelach [dB]. **Bel jest to jednostka miary logarytmicznej stosunku dwóch porównywanych mocy sygnału** (często korzysta się z pomiarów w skali napięcia, prądu lub impedancji).

$$\text{liczba decybeli} = 10 \log \frac{P}{P_0},$$

przy czym P i P_0 są to wartości dwóch porównywanych mocy.

2.1.1. Głośniki

Zasada działania głośnika jest następująca:

- przebieg elektryczny wywołuje w przetworniku elektroakustycznym drgania membrany;
- membrana przekazuje drgania cząsteczkom powietrza;
- drgające cząsteczki powietrza tworzą falę akustyczną.

Powszechnie stosowanymi głośnikami są głośniki dynamiczne z przetwornikiem magnetoelektrycznym. Głośniki klasyfikuje się ze względu na:

- sposób promieniowania energii akustycznej — **głośniki otwarte i tubowe**;
- zastosowanie (zakres odtwarzanych częstotliwości) — **głośniki niskotonowe, wysokotonowe, średnionowe, ultrawysokotonowe, szerokopasmowe i standardowe** (w zestawach muzycznych, w odbiornikach radiowych przenośnych, samochodowych, telewizorach).

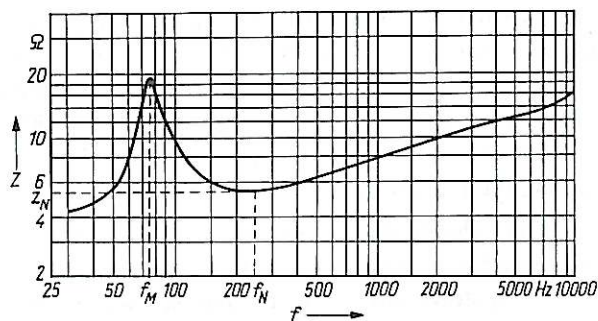
Bardzo duży wpływ na własności głośnika ma kształt powierzchni membrany, która może mieć przekrój eliptyczny lub kołowy. Konstruuje się membrany o kształcie:

- czaszy kulistej (w głośnikach tubowych, słuchawkach, mikrofonach magnetoelektrycznych);
- płaskim (w słuchawkach, mikrofonach);
- stożkowym (w głośnikach stożkowych i tubowych, słuchawkach elektromagnetycznych i piezoelektrycznych oraz mikrofonach);
- wykładniczym (w głośnikach stożkowych).

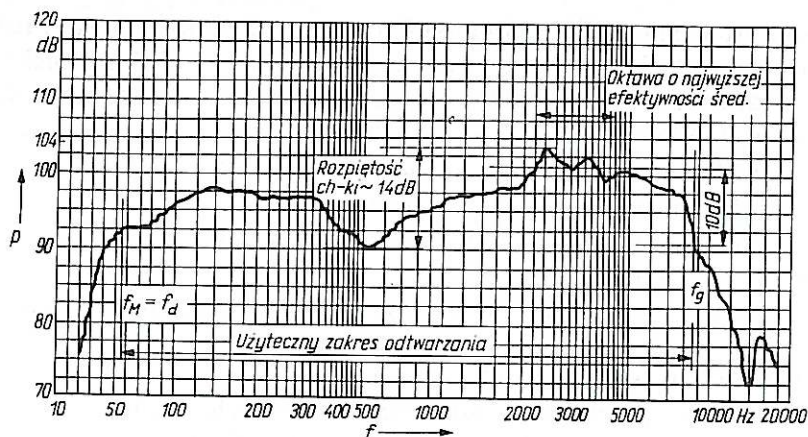
W katalogach najczęściej są podawane trzy podstawowe parametry głośników:

- 1) **moc znamionowa** — P_N — wartość mocy elektrycznej, którą głośnik może być obciążony w sposób stały;
- 2) **impedancja znamionowa** — Z_N — **najmniejsza wartość impedancji dla częstotliwości powyżej częstotliwości rezonansu mechanicznego f_M** (odpowiada to dolnej częstotliwości przenoszenia), dla którego impedancja osiąga pierwsze minimum (rys. 2.1);

Rys. 2.1. Zależność impedancji głośnika od częstotliwości [17]
 Z_N — impedancja znamionowa,
 f_M — częstotliwość rezonansu mechanicznego, f_N — częstotliwość, przy której jest określana wartość Z_N



- 3) **zakres przetwarzanych częstotliwości** — charakterystyka przenoszenia przedstawiająca zmiany ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości (rys. 2.2), przy stałej wartości napięcia doprowadzonego do głośnika. Na podstawie tej charakterystyki wyznacza się górną częstotliwość graniczną, definiowaną jako częstotliwość, przy której ciśnienie akustyczne wytwarzane przez głośnik spada o 10 dB poniżej średniej wartości ciśnienia w środkowej części pasma przenoszenia głośnika. **Zakres częstotliwości między dolną a górną częstotliwością graniczną stanowi pasmo użyteczne głośnika.** Konstrukcję głośnika magnetoelektrycznego pokazano na rys. 2.3.

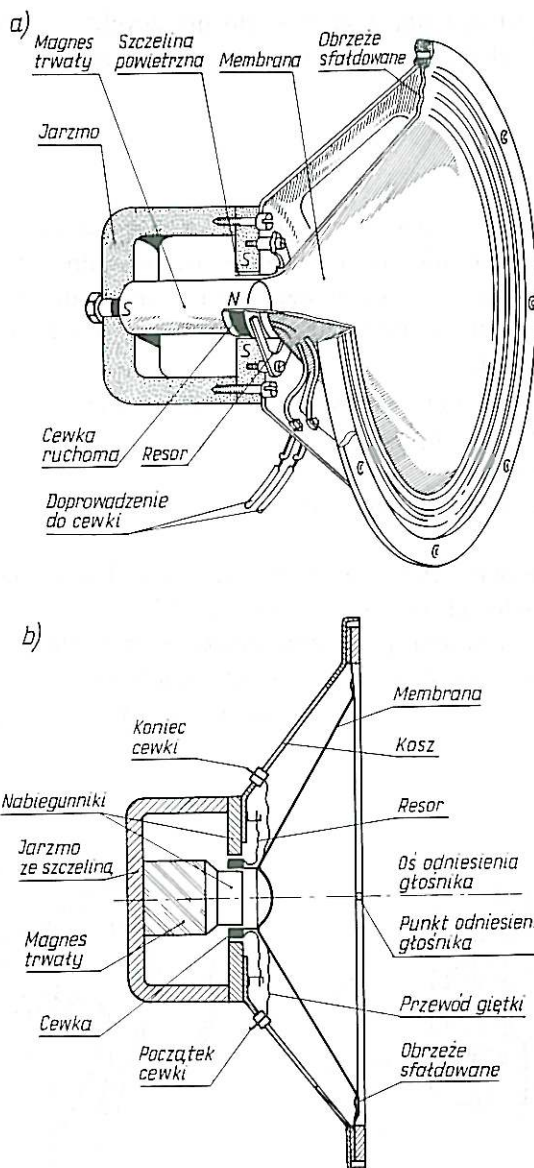


Rys. 2.2. Przykładowa charakterystyka przenoszenia głośnika [17]
 p — ciśnienie akustyczne

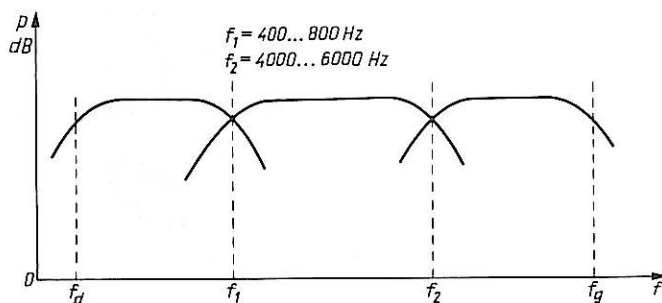
Pojedyncze głośniki mogą być łączone w **zespoły głośnikowe**. Optymalnym rozwiązaniem zespołu głośnikowego jest trójdrożny zespół głośnikowy. Pasma przenoszenia takiego zespołu wynosi np. $50 \div 12\,500$ Hz i jest podzielone na trzy rozdzielone pasma, z których każde jest odtwarzane za pomocą odrębnego głośnika. Zespół taki ma trzy głośniki: niskotonowy, średniotonowy i wysokotonowy. Zamiast jednego głośnika mogą być użyte dwa głośniki, jeżeli jest to pożądane ze względu na moc głośników. Rozdział pasma między głośnikiem nisko- i średniotonowym powinien przypadać w przedziale częstotliwości $400 \div 800$ Hz, a między głośnikiem średnio- i wysokotonowym — w przedziale $4000 \div 6000$ Hz (rys. 2.4). Są również zespoły głośnikowe dwudrożne, w których rozdzielone pasmo częstotliwości powinno znajdować się w jednym z przedziałów: $4000 \div 5000$ Hz, $2000 \div 2500$ Hz, 1500 Hz lub $600 \div 800$ Hz. Podział ten zależy od rodzaju głośnika i wymagań stawianych zespołowi.

Zespoły głośnikowe umieszczają się w obudowach zamkniętych (kompakt) lub otwartych. Zespoły głośnikowe w obudowach zamkniętych dobrze przenoszą małe częstotliwości. Są to najczęściej stosowane obudowy, zapewniające przy małych wymiarach najszerze pasmo przenoszenia. Natomiast zespoły głośnikowe w obudowach otwartych o wymiarach podobnych do obudów zamkniętych mają gorsze charakterystyki częstotliwościowe w zakresie niskich tonów (małe częstotliwości).

Głośniki i zespoły głośnikowe produkcji polskiej (Tonsil S.A.) mają **oznaczenia literowo-cyfrowe**. Litery oznaczają: **GD** — głośnik dynamiczny, **W** — wysokotonowy, **N** — niskotonowy, **S** — szerokopasmowy, **M** — średniotonowy, **K** — kopułowy, **T** — tubowy, **ZG** — zespół głośnikowy, **C** — w obudowie zamkniętej (compact), **B** — w obudowie otwartej (bass-reflex). Pierwsza cyfra oznacza średnicę kosza głośnika w centymetrach, druga (pierwsza dla zespołów głośnikowych) — określa moc znamionową



Rys. 2.3. Konstrukcja głośnika magnetoelektrycznego: a) widok ogólny; b) w przekroju



Rys. 2.4. Charakterystyka trójdrożnego zespołu głośnikowego

w watach, trzecia (drużga dla zespołów głośnikowych) — oznacza wersję lub sposób wykonania głośnika. Cyfry między sobą są oddzielone kreską pionową.

2.1.2. Słuchawki

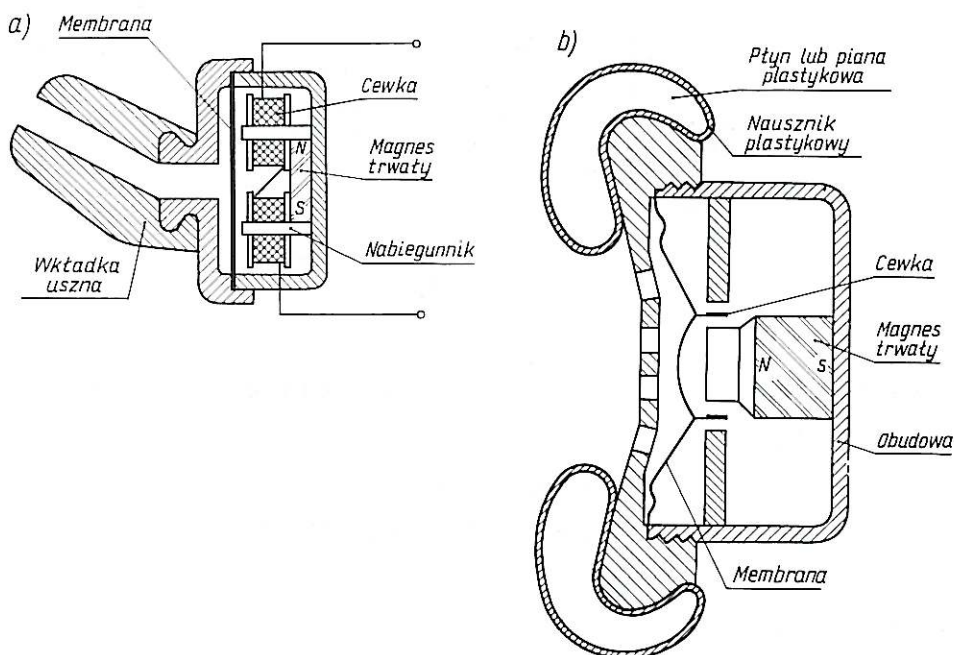
Słuchawki stosuje się w warunkach, gdy odsłuch głośnikowy jest niemożliwy lub niepożądany. Słuchawki można włączać bezpośrednio w tor foniczny bez potrzeby wzmacniania sygnału, ze względu na ich bardzo mały pobór mocy (kilka mW). Są one używane w urządzeniach Hi-Fi i telekomunikacyjnych (słuchawki telefoniczne).

W zależności od sposobu przetwarzania energii elektrycznej, wyróżnia się kilka typów słuchawek, np.:

- elektromagnetyczne;
- magnetoelektryczne (dynamiczne);
- elektrostatyczne.

Konstrukcję słuchawki elektromagnetycznej przedstawiono na rys. 2.5a, a słuchawki magnetoelektrycznej — na rys. 2.5b.

Jakość odtwarzania dźwięku przez **słuchawki elektromagnetyczne** jest mierzna; pasmo przenoszenia zawiera się w granicach $100\text{ Hz} \div 5\text{ kHz}$ z nierównomiernością ok. $\pm 10\text{ dB}$. Słuchawki te mają zazwyczaj wymienne wkładki.



Rys. 2.5. Budowa słuchawki: a) elektromagnetycznej; b) magnetoelektrycznej [16]

Do odsłuchu stereofonicznego stosuje się **sluchawki magnetoelektryczne (dynamiczne)**, używane również w urządzeniach telefonicznych. Są to słuchawki o wysokiej jakości odtwarzania dźwięków; pasmo przenoszenia wynosi $30 \text{ Hz} \div 15 \text{ kHz}$ z nierównomiernością ok. $\pm 5 \text{ dB}$. Ich konstrukcja jest zbliżona do mikrofonu dynamicznego, a zasada działania zbliżona do działania głośnika dynamicznego.

W urządzeniach elektronicznych mogą być również stosowane **sluchawki elektrostatyczne**, ale wymagają one dodatkowego źródła polaryzacji (zasilacz sieciowy).

Słuchawki, podobnie jak głośniki, są oznaczane literami: **SN** — słuchawka nagłowna, **SM** — słuchawka miniaturowa.

2.1.3. Mikrofony

Zasada działania mikrofonu jest następująca:

- dźwięk (fala akustyczna) wywołuje ruch drgający cząsteczek powietrza;
- drgające cząsteczki powietrza powodują drgania membrany przetwornika elektroakustycznego;
- przetwornik zamienia drgania membrany na sygnał elektryczny.

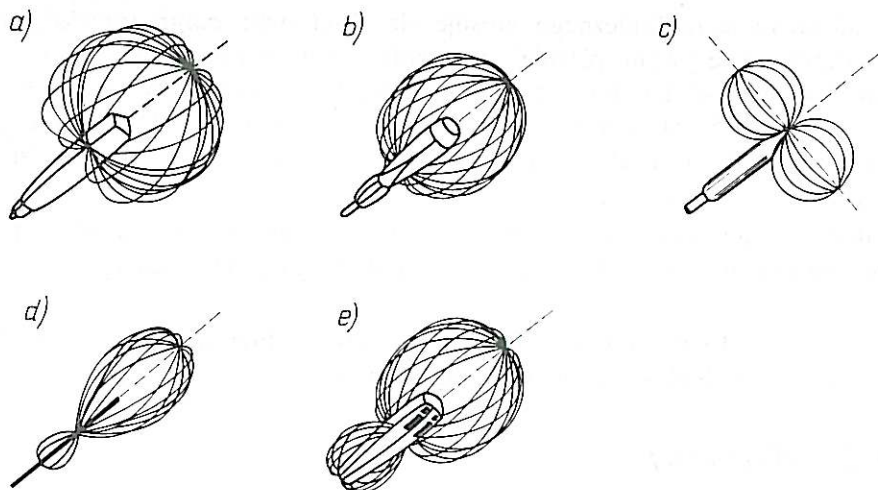
Najważniejszą częścią składową mikrofonu jest membrana, na którą działa ciśnienie akustyczne lub gradient ciśnienia. **Przez pojęcie gradientu ciśnienia akustycznego należy rozumieć różnicę ciśnień występującą po obu stronach membrany mikrofonu, odniesioną do długości drogi fali dźwiękowej, padającej na przednią i tylną stronę membrany.** Stąd wynika podział mikrofonów na ciśnieniowe i gradientowe.

Membrana mikrofonu wygina się w zależności od kierunku padającej fali akustycznej. W związku z tym poszczególne mikrofony mają różne **charakterystyki kierunkowości** — rys. 2.6 (zależność skuteczności mikrofonu od kąta, pod jakim pada nań fala dźwiękowa). Kształt charakterystyki kierunkowości mikrofonu zależy również od częstotliwości odbieranej fali dźwiękowej.

Do podstawowych parametrów mikrofonów należą:

- **skuteczność** (stosunek napięcia na wyjściu mikrofonu do ciśnienia akustycznego działającego na membranę, przy określonej częstotliwości);
- **zakres przetwarzanych częstotliwości**;
- **impedancja wyjściowa** (impedancja cewki drgającej lub innego układu wyjściowego, mierzona na wyjściu mikrofonu przy danej częstotliwości).

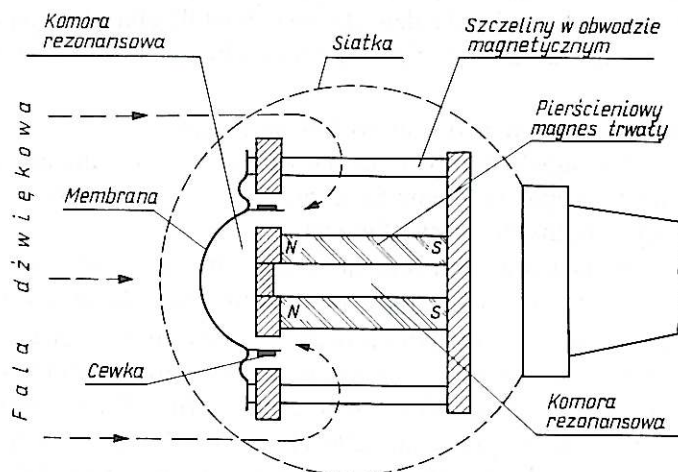
Ze względu na sposób przetwarzania drgań membrany w sygnał dźwiękowy, mikrofony dzieli się na węglowe, piezoelektryczne, magnetoelektryczne (dynamiczne) i pojemnościowe (elektrostatyczne). **Mikrofony węglowe** przetwarzają częstotliwości w przedziale $200 \text{ Hz} \div 4 \text{ kHz}$ (ucho ludzkie odbiera częstotliwości od 16 Hz do 16 kHz), **mikrofony magnetoelektryczne** — $30 \text{ Hz} \div 10 \text{ kHz}$, natomiast **mikrofony piezoelektryczne** — $12 \text{ Hz} \div 14 \text{ kHz}$.



Rys. 2.6. Charakterystyki kierunkowe mikrofonów: a) nerkowa; b) kulista; c) ósemkowa; d) ostrokierunkowa; e) kardoidalna [8]

Mikrofony węglowe są stosowane w telefonach, magnetoelektryczne — w urządzeniach radiofonicznych, a piezoelektryczne — w magnetofonach. **Mikrofony pojemnościowe** są stosowane jako mikrofony studyjne, ze względu na ich wysoką klasę. Poza tym mikrofony mogą być przewodowe lub bezprzewodowe. Konstrukcję mikrofonu magnetoelektrycznego przedstawiono na rys. 2.7.

Wybierając rodzaj mikrofonu, należy wziąć pod uwagę, z jakimi urządzeniami będzie on współpracował, w jakich warunkach oraz jakie pasmo częstotliwości powinien on przenosić.



Rys. 2.7. Budowa mikrofonu magnetoelektrycznego [16]

Mikrofony produkcji krajowej mają również **oznaczenia literowe**, w których **M** oznacza mikrofon (pierwsza litera): **D** — dynamiczny, **C** — pojemnościowy, **K** — piezoelektryczny (druga litera); **O** — kołowa charakterystyka kierunkowości, **U** — kierunkowa charakterystyka (trzecia litera). Cyfra natomiast oznacza numer opracowania.

Pytania kontrolne:

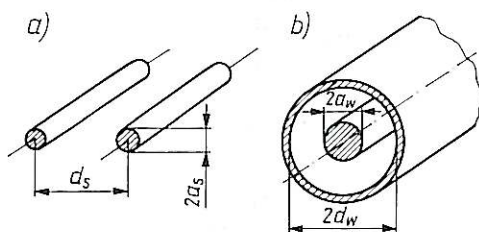
1. Na podstawie katalogów przedstaw zastosowanie różnych typów:
 - a) głośników;
 - b) mikrofonów;
 - c) słuchawek.
2. Na podstawie katalogów przygotuj zestawienie, uwzględniając zastosowane przetworniki w:
 - a) głośnikach;
 - b) mikrofonach;
 - c) słuchawkach.
3. W jaki sposób powinny być dobierane głośniki w zespołach głośnikowych?
4. Wymień znane Ci typy słuchawek.
5. Na podstawie katalogów spróbuj znaleźć związek między charakterystykami a zastosowanymi przetwornikami w danym rodzaju mikrofonu.
6. Jakie znasz charakterystyki kierunkowości mikrofonów i od czego zależy ich kształt?
7. Na co należy zwrócić uwagę przy doborze mikrofonu?

2.2. Linia długa

Przewody (kable) o długości co najmniej kilkakrotnie większej od długości fali przesyłanego sygnału elektromagnetycznego wielkiej częstotliwości — nazywamy liniami długimi.

Na przykład przewód o długości 5 m jest linią długą dla sygnału o częstotliwości 200 MHz, któremu odpowiada długość fali 150 cm. Tak więc liniami długimi są linie telewizyjne i telekomunikacyjne, którymi przesyła się sygnały o częstotliwościach z przedziału 0,1 ÷ 1000 MHz oraz linie mikrofalowe (do 10 GHz).

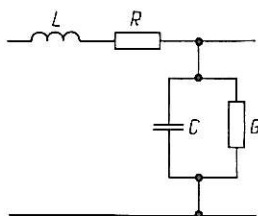
Linie długie mogą być wykonane jako przewody symetryczne (rys. 2.8a) lub koncentryczne (współosiowe — rys. 2.8b).



Rys. 2.8. Rodzaje linii długiej: a) symetryczna; b) współosiowa (koncentryczna) [8]

d_s — odległość między środkami przewodów symetrycznych w linii symetrycznej, a_s — promień przewodu linii symetrycznej, a_w — promień wewnętrzny kabla zewnętrznego w linii współosiowej, a_w — promień rdzenia

Podstawowymi parametrami linii długiej, które przypadają na jednostkę długości przewodu są: **rezystancja jednostkowa** — R , **pojemność jednostkowa** — C , **indukcyjność jednostkowa** — L oraz **upływność jednostkowa** — G . Schemat zastępczy linii długiej przedstawiono na rys. 2.9.



Rys. 2.9. Schemat zastępczy linii długiej
 R — rezystancja jednostkowa, L — indukcyjność jednostkowa, C — pojemność jednostkowa, G — konduktancja jednostkowa

Natomiast parametrami charakteryzującymi linię długą są: **współczynnik przenoszenia** — γ i **impedancja falowa** — Z_c .

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}},$$

a dla linii bez strat $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ lub $Z_c = \sqrt{Z_z Z_o}$,

przy czym: Z_z — impedancja linii długiej w stanie zwarcia, a Z_o — impedancja w stanie rozwarcia.

Współczynnik przenoszenia dla linii długiej, w której są straty można określić wzorem

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta,$$

w którym: α — współczynnik tłumienia, a β — współczynnik przesunięcia, wyrażany w radianach.

Linie długie, w których nie występują straty charakteryzują się rezystancją równą zero i upływnością równą nieskończoności. Indukcyjność i pojemność linii długiej oblicza się ze wzorów:

dla linii symetrycznej

$$L = 0,4 \ln \frac{d_s}{a_s},$$

$$C = 27,8 \epsilon_r / \ln \frac{d_s}{a_s},$$

$$Z_c = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{d_s}{a_s},$$

dla linii współosiowej

$$L = 0,2 \ln \frac{d_w}{a_w},$$

$$C = 55,5 \epsilon_r / \ln \frac{d_w}{a_w},$$

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{d_w}{a_w},$$

przy czym: L — indukcyjność linii o długości 1 m ($\mu\text{H/m}$), C — pojemność linii o długości 1 m (pF/m), ϵ_r — przenikalność dielektryczna ośrodka, a_s — promień przewodu linii symetrycznej (mm), a_w — promień przewodu wewnętrznego (mm), d_s — odległość między środkami przewodów symetrycznych w linii symetrycznej (mm), d_w — promień wewnętrzny przewodu zewnętrznego w linii współosiowej (mm).

Podczas projektowania lub konstruowania układów z linią długą, należy pamiętać o dopasowaniu jej na wejściu i wyjściu (**impedancja falowa linii długiej powinna być równa impedancji źródła sygnału i impedancji obciążenia**). Niedopasowanie impedancji może spowodować odbicia fali elektromagnetycznej (sygnału), a w konsekwencji zakłócenia sygnału użytecznego. Niekiedy zjawisko odbicia fali elektromagnetycznej jest wykorzystywane w praktyce (na przykład linie długie ćwierćfalowe i półfalowe są używane do dopasowania innej linii długiej).

2.3. Światłowody

Światłowody służą do przesyłania (transmisji) na różne odległości (nawet do 200 km) **fal elektromagnetycznych — w postaci światła lub obrazu — o częstotliwościach optycznych** ($3,95 \div 7,9 \times 10^{14}$ Hz). Odnaczają się one niewielkim tłumieniem transmitowanego sygnału oraz bardzo szerokim pasmem przenoszenia, dochodzącym do dziesiątków gigaherców. Światłowody są wykonywane z tworzywa sztucznego lub z włókna szklanego (głównie szkło nieorganiczne); mogą być jednowłóknowe lub wiązkowe. Pojedyncze włókno jest zbudowane z rdzenia (szkło o dużym współczynniku załamania światła n_1), którego średnica może wynosić od 50 do 1000 μm i płaszczu (szkło o małym współczynniku załamania światła — n_2) o średnicy od 125 do 1050 μm .

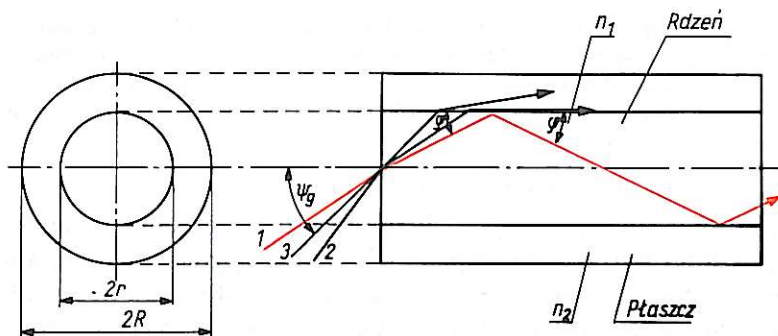
Przesyłanie fali światłowodem odbywa się w wyniku zjawiska całkowitego odbicia (kąt padania równy kątowi odbicia) światła od powierzchni wewnętrznej, co przedstawiono na rys. 2.10. **Kąt odbicia światła**, przy którym następuje całkowite odbicie, jest określony stosunkiem współczynnika załamania światła w rdzeniu — n_1 i współczynnika załamania światła w płaszczu — n_2 . Odbiciu będą ulegały tylko te promienie, które padają pod mniejszym kątem niż **kąt graniczny** — ψ_g .

$$n_0 \sin \psi_g = \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

przy czym n_0 jest współczynnikiem załamania światła w ośrodku otaczającym włókno.

Światło będzie transmitowane, jeżeli kąt padania będzie mniejszy od **kąta krytycznego** — φ .

$$\cos \varphi = n_2 / n_1.$$



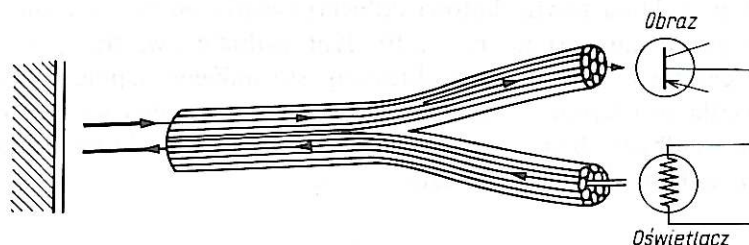
Rys. 2.10. Przekrój włókna światłowodowego i przesłanie fali światłowodem [11]
 r — promień rdzenia, R — promień płaszczu, n_1 — współczynnik załamania rdzenia, n_2 — współczynnik załamania płaszczu, ψ_g — kąt graniczny, φ — kąt krytyczny, 1, 3 — promienie podlegające transmisji, 2 — promień nie jest transmitowany

Światło padające na powierzchnię czołową światłowodu jest transmitowane bez strat, gdy kąt graniczny będzie równy 90° , co zachodzi przy $n_1 = 1,80$ i $n_2 = 1,50$. Jeżeli $n_1 = 1,62$ i $n_2 = 1,52$, to kąt graniczny wynosi 34° .

Światłowody są coraz powszechniej stosowane w wielu dziedzinach nauki, techniki i medycyny, np.:

- telekomunikacji (przesyłanie sygnałów telefonicznych, telewizyjnych czy transmisji danych);
- technice fotografowania (endoskopia);
- technice komputerowej (połączenia sieciowe);
- wojskowości (w samolotach, okrętach czy pojazdach bojowych).

Na uwagę zasługują urządzenia zwane **fiberoskopami** (rys. 2.11), w których część włókien służy do oświetlenia niedostępnego przedmiotu, a pozostałe przenoszą jego obraz.



Rys. 2.11. Zasada działania fiberoskopu [11]

Ze względu na warunek propagacji fal świetlnych rozróżnia się światłowody jedno- i wielomodowe. **Mod światłowodowy jest to pojedynczy rodzaj drgań własnych światłowodu** (lub inaczej jest to liczba kątów, pod jakimi wprowadza się falę do światłowodu). Ogólnie w światłowodzie mogą być wzbudzone drgania własne rdzenia — **mody falowodowe**, oraz drgania

własne płaszczka — **mody wypływowe**. Zmniejszając średnicę rdzenia światłowodu, zmniejsza się liczbę transmitowanych modów. W światłowodzie będzie rozchodził się tylko jeden mod, jeżeli będzie spełniony następujący warunek:

$$\frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,4 ,$$

przy czym: r — promień rdzenia, λ — długość fali.

Dla światłowodu o średnicy kilku μm transmitującego falę optyczną, warunek jednomodowości jest spełniony, np. przy $n_1 = 1,5$ i $n_2 = 1,485$.

Wymiary światłowodów podano w tab. 2.1.

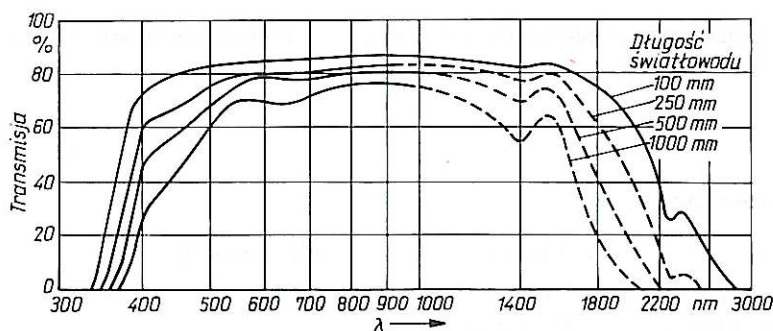
Tabela 2.1

Wymiary światłowodów w zależności od zmiany współczynnika załamania światła

Średnica	Rodzaj światłowodu		
	wielomodowy		jednomodowy skokowy
	skokowy*	gradientowy*	
rdzenia	50÷1000 μm	50÷100 μm	4÷10 μm
płaszczka	125÷1050 μm	125 i 140 μm	75 i 125 μm

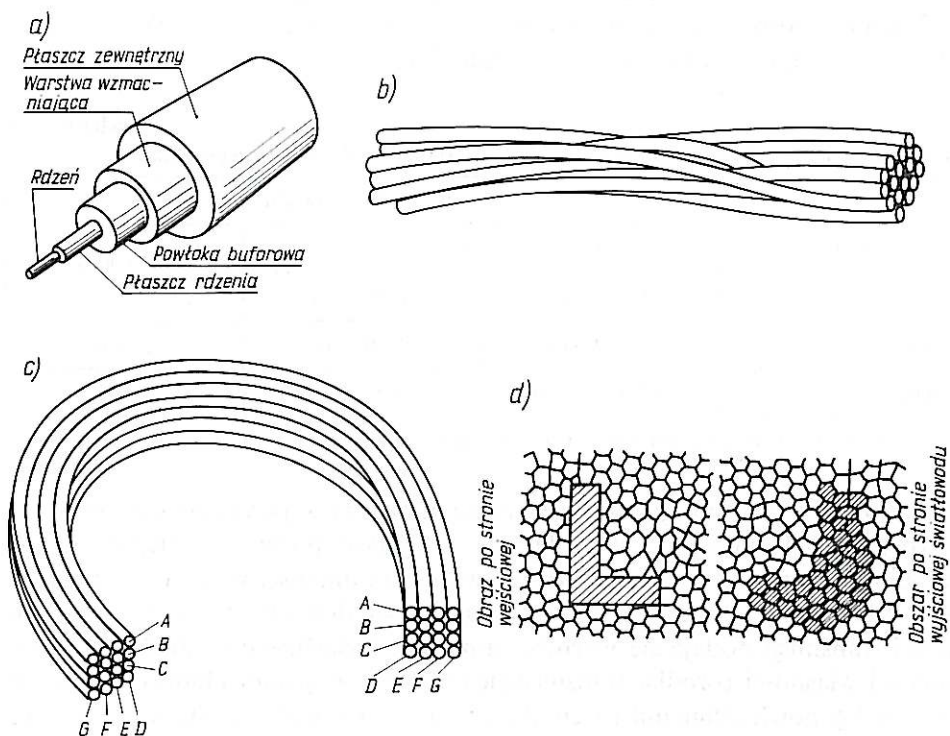
* — skokowy lub gradientowy jest to rozkład współczynnika załamania światła.

Światłowody transmitują falę elektromagnetyczną z pewnymi stratami (absorbacja promieniowania w szkłe, nie wszystkie promienie ulegają całkowitemu odbiciu), które rosną wraz ze wzrostem długości przenoszonej fali — rys. 2.12. Straty zależą również od długości światłowodu. Do oceny poprawności transmisji podaje się wartość **tłumienia światłowodu** (dB/km). Zależy ona od własności ośrodka transmisyjnego (czystość, jednorodność), nierówności między powierzchniami rdzeń-płaszcz oraz od zmian kształtu światłowodu.



Rys. 2.12. Zależność jakości transmisji w światłowodzie od długości fali i długości światłowodu [11]

Wyróżniamy **światłowody jednowłóknowe** (stosowane w telekomunikacji — rys. 2.13a) i **wiązkowe** (do transmisji światła — rys. 2.13b i transmisji obrazu — rys. 2.13c). Światłowody, za pomocą których przesyła się obrazy, mogą być sztywne (można je obracać tak jak pręty szklane, a po podgrzaniu do wysokiej temperatury dają się wyginać) lub giętkie. Obecnie wykonuje się również światłowody z tworzyw sztucznych. Zaletą takiego światłowodu jest to, że może być on cięty przez użytkownika.



Rys. 2.13. Światłowód: a) jednowłóknowy; b) wiązkowy do transmisji światła; c) wiązkowy do transmisji obrazu; d) obraz uzyskany w wyniku transmisji [11]

Pytania kontrolne:

1. Jaka jest różnica między linią symetryczną a współosiową?
2. Jakie parametry będzie miała linia symetryczna, a jakie współosiowa, jeśli:
 - a) $2a = 1 \text{ mm}$, $d = 8 \text{ mm}$;
 - b) $2a = 0,5 \text{ mm}$, $d = 2,5 \text{ mm}$;
 - c) $2a = 0,75 \text{ mm}$, $d = 5 \text{ mm}$?

3. Jaka jest różnica między światłowodem służącym do transmisji światła a światłowodem do transmisji obrazu?
4. Jakie muszą być spełnione warunki do transmisji światła, a jakie do transmisji obrazu?
5. Czym różni się kąt graniczny od krytycznego i jakie są ich wartości w światłowodzie, jeśli współczynniki załamania światła wynoszą:
 - a) $n_1 = 1,71$, $n_2 = 1,50$;
 - b) $n_1 = 1,76$, $n_2 = 1,51$;
 - c) $n_1 = 1,67$, $n_2 = 1,52$.
6. Co to jest i do czego służy fiberoskop?
7. Podaj różnice i podobieństwa światłowodu i linii długiej.

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Fizyka i elektrotechnika:

- Prawa optyki.
- Pojęcie promienia świetlnego.
- Ruch i tor elektronu w polu elektrycznym i magnetycznym.

3. Optyka elektronowa

Optyka elektronowa zajmuje się nie tylko ruchem i kształtowaniem toru elektronu pod wpływem działania pola elektrycznego i magnetycznego, ale również formowaniem, strukturą i sterowaniem wiązki elektronowej (zbiór torów elektronów) oraz jej zastosowaniem.

Elementami w optyce elektronowej są:

- **wyrzutnie elektronowe** (będące źródłem elektronów i służące do ich przyspieszania i formowania w wiązkę elektronową);
- **soczewki elektronowe** (służące do skupiania i ogniskowania w danym punkcie wiązki elektronowej — soczewki mogą być elektryczne i magnetyczne);
- **układy odchylające** (służące do odchylania torów elektronów);
- **analizatory prędkości** (mierzące liczbę elektronów mających określone prędkości);
- **akceleratory cząstek naładowanych** (układy przyspieszające te cząstki);
- **źródła energii**.

Do układów elektronooptycznych zaliczamy:

- **lampy elektronopromieniowe** (mikrofalowe, oscyloskopowe, obrazowe, analizujące i kineskopy);
- **urządzenia elektronowiązkowe** (wzmacniacze obrazu, mikroskopy elektronowe, urządzenia do topienia i spawania metali).

3.1. Podstawowe prawa i pojęcia optyki elektronowej

Elektrony pod wpływem działania pola elektromagnetycznego poruszają się po torach prostoliniowych lub krzywoliniowych (gdzie elektron może poruszać się po linii śrubowej lub po cykloidzie). **Tor elektronu** można opisać równaniem ruchu elektronu w polu elektromagnetycznym

$$\frac{d}{dt}(m\vec{v}) = -e\vec{E} - e[\vec{v} \times \vec{B}],$$

przy czym: m — masa elektronu, $\vec{v}$ — wektor prędkości elektronu, $\vec{E}$ — wektor natężenia pola elektrycznego, $\vec{B}$ — wektor natężenia pola magnetycznego, e — ładunek elektronu.

Każdy elektron poruszający się w polu elektromagnetycznym ma **energię kinetyczną** i **potencjalną**, których wartości można obliczyć korzystając ze wzorów:

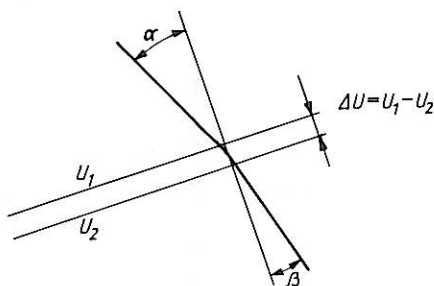
$$E_k = mv^2/2,$$

$$E_p = -eU.$$

Podstawowym prawem optyki elektronowej jest prawo załamania (rys. 3.1) toru ruchu elektronu (promień elektronowy), dla którego **współczynnik załamania**

$$n = \sin\alpha / \sin\beta = v_1 / v_2 = \sqrt{U_2 / U_1},$$

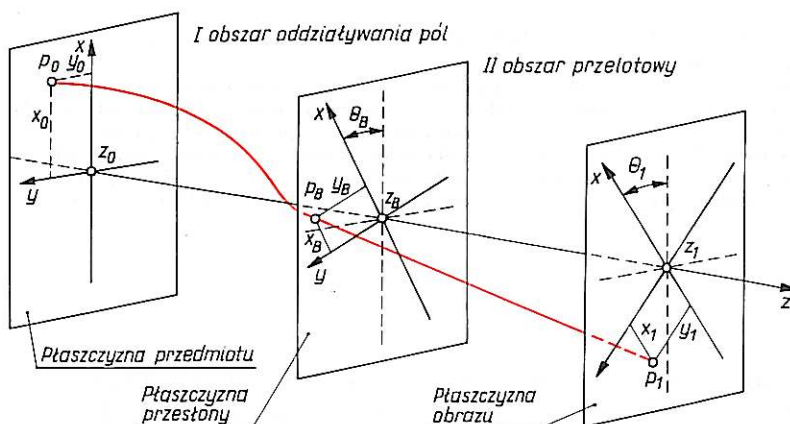
przy czym: α i β — kąt padania i kąt załamania: v_1 i v_2 — prędkości elektronów odpowiadające napięciu U_1 i U_2 . Załamanie promienia elektronowego następuje między powierzchniami ekwipotencjalnymi (U_1 i U_2).



Rys. 3.1. Załamanie promienia elektronowego [2]
 U_1 , U_2 — powierzchnie ekwipotencjalne, α — kąt padania promienia, β — kąt załamania

Wiązkę elektronową tworzą elektrony pochodzące z jednego źródła emisyjnego, które poruszają się w jednym kierunku w próżni w wyniku oddziaływania przyspieszającego pola elektrycznego.

Optyka elektronowa umożliwia tworzenie obrazów, co przedstawiono na rys. 3.2. Punkt jest odwzorowany w plamkę w wyniku istniejących błędów odwzorowania związanych z działaniem pola elektrycznego i mag-

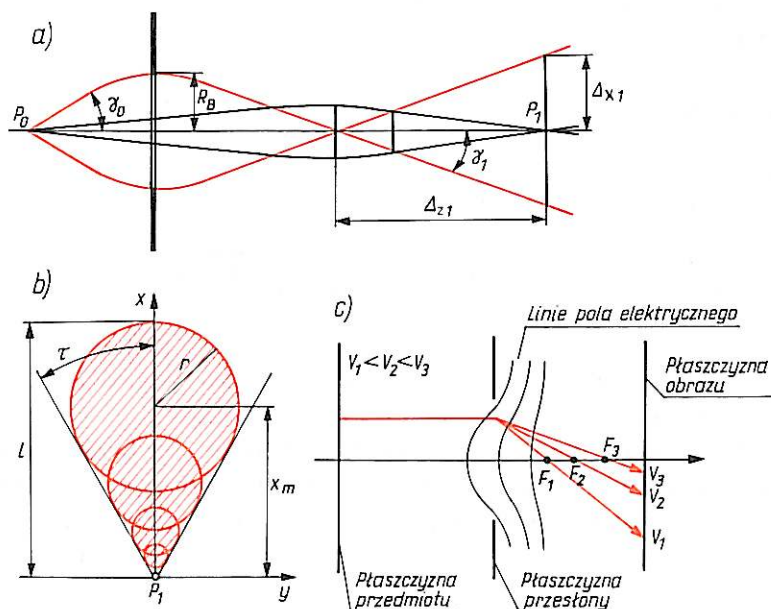


Rys. 3.2. Proces tworzenia się obrazu [10]

P_0 — punkt przedmiotu, P_B — punkt przedmiotu na przesłonie, P_1 — punkt obrazu, θ_B , θ_1 — kąty skrócenia obrazu przedmiotu w wyniku istnienia pola magnetycznego

netycznego. Najczęściej spotykanymi błędami odwzorowania obrazu, związanymi z polem elektrycznym, są:

- **aberracja sferyczna** (punkt obrazu jest przetwarzany w krążek — rys. 3.3a);
- **przecinkowość** — koma (obraz przypomina przecinek — rys. 3.3b);
- **astygmatyzm** (punkt jest przetwarzany w dwa punkty, w wyniku czego powstaje obraz w kształcie elipsy).



Rys. 3.3. Błędy odwzorowania obrazu: a) aberracja sferyczna; b) koma;

c) aberracja chromatyczna [10]

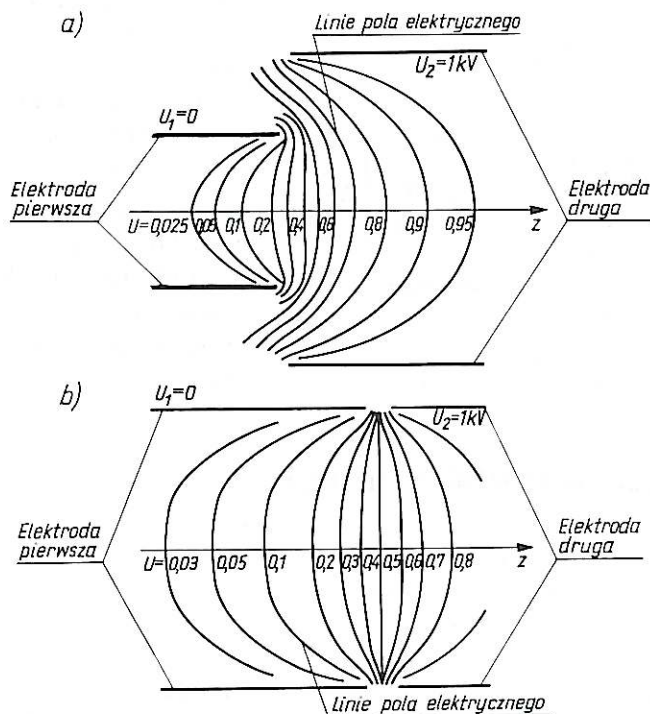
P_0 — punkt przedmiotu, P_1 — punkt obrazu, γ_0 — maksymalny kąt, pod jakim są emitowane elektrony z punktu przedmiotu, R_B — promień przesłony; Δx_1 — promień rozmycia obrazu przedmiotu, Δz_1 — odległość płaszczyzny obrazu od soczewki, γ_1 — odchylenie skrajnych promieni po skupieniu, $\tau = 30^\circ$ — kąt, jaki tworzy styczna do okręgów z prostą łączącą środki tych okręgów, l — wielkość rozmycia obrazu, r — maksymalny promień koła tworzącego błąd, x_m — odległość środka największego koła od punktu obrazu, F_1, F_2, F_3 — tory elektronów po przejściu przez przesłonę, v_1, v_2, v_3 — prędkości elektronów startujących z jednego punktu

Pole elektromagnetyczne wprowadza zniekształcenia anizotropowe, powodujące takie same błędy obrazu jak pole elektryczne, oraz dodatkowo skręcenie obrazu. Inne błędy odwzorowania są związane z rozmyciem obrazu, powstałym w wyniku ugięcia wiązki elektronów na przesłonie (dyfrakcja) oraz odchylenia toru elektronu (aberracja chromatyczna — rys. 3.3c).

3.2. Soczewki elektronowe

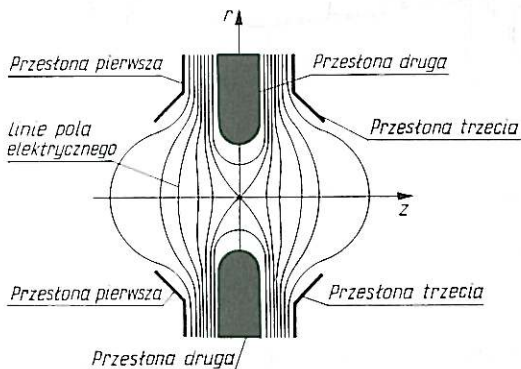
Soczewka elektronowa, tak jak i świetlna, ma zdolności skupiające bądź rozpraszające. Rozróżniamy następujące **soczewki elektronowe**:

- **immersyjna** (energia elektronu zmniejsza się lub zwiększa po przejściu przez tę soczewkę) — rys. 3.4;



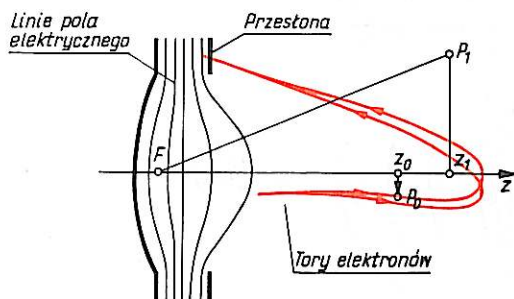
Rys. 3.4. Soczewki immersyjne: a), b) rozkład pola w soczewkach dwururowych [10]

U_1 , U_2 — potencjały elektrod, U — rozkład napięcia na osi między elektrodami



Rys. 3.5. Soczewka symetryczna [10]

- **katodowa** (rodzaj soczewki immersyjnej, w której przedmiot emituje elektrony — fotokatoda);
- **symetryczna**, zwana również pojedynczą (wykorzystywana w mikroskopach elektronowych, utworzona przez obszar pola między trzema przesłonami — trzema soczewkami elementarnymi) — rys. 3.5;



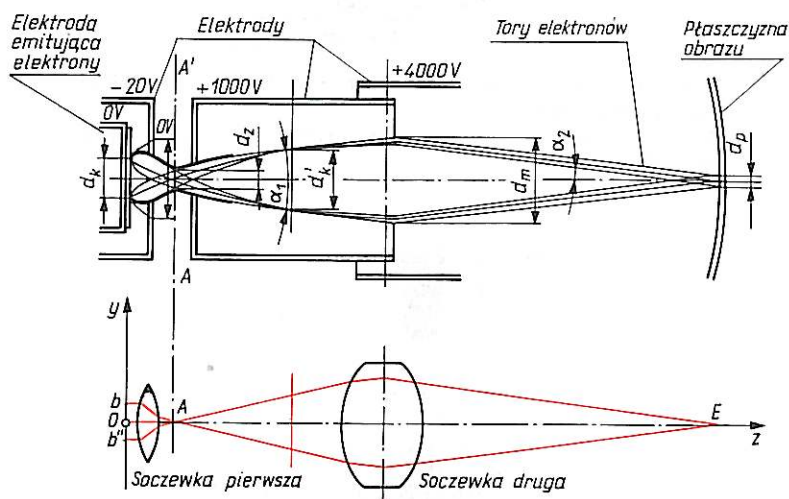
Rys. 3.6. Zwierciadło elektronowe [10]
 P_0 — źródło elektronów, P_1 — obraz punktu P_0

- **przesłonowa** (utworzona przez obszar pola elektrycznego w obrębie otworu lub szczeliny);
- **zwierciadło elektronowe** (zawraca tory elektronów w stronę ich źródła) — rys. 3.6.

Oprócz wymienionych, wyróżniamy także soczewki kwadrupolowe i oktopolowe, które są stosowane np. w akceleratorach cząstek i spektrometrach masowych.

3.3. Wyrzutnie elektronowe

Wyrzutnię elektronową stanowi źródło elektronów i soczewka elektronowa, która ogniskuje wiązkę elektronową (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Wyrzutnia elektronowa [10]
 $A-A'$ — płaszczyzna ogniskowania wiązki, d_k — średnica krążka emitującego elektrony, d_p — średnica obrazu, E — punkt na ekranie, $b+b''=d_k$

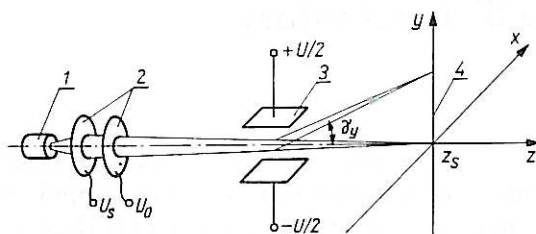
Podstawowym parametrem wyrzutni jest **jaskrawość elektronowa**, która zależy od prądu wiązki i od jej powierzchni przekroju. Pierwszą soczewką w wyrzutni elektronowej jest soczewka katodowa, zbudowana z katody emitującej elektrony, elektrody sterującej oraz anody przyspieszającej elektrony.

3.4. Układy odchylające

Zadaniem układu odchylającego jest odchylenie wiązki elektronów (rys. 3.8). Pierwszym elementem układu odchylającego jest wyrzutnia elektrowna. Wiązka elektronowa wychodząca z wyrzutni jest ogniskowana przez soczewkę symetryczną (dwuprzęsłową). Tak zogniskowana wiązka jest

Rys. 3.8. Położenie wyrzutni elektrownej (1) względem soczewki ogniskującej (2) i układu odchylającego (3) oraz płaszczyzny obrazu (4)

[10]
 U_s , U_0 , U — potencjały poszczególnych elektrod, γ_y — kąt odchylenia wiązki, z_s — punkt na ekranie

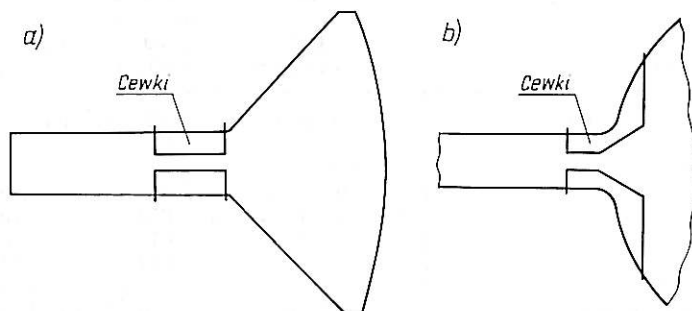


odchylana w płaszczyźnie XY , w wyniku działania pola elektrycznego (odchylenie elektrostatyczne) lub magnetycznego (odchylenie magnetyczne).

Odchylenie elektrostatyczne stosuje się w oscyloskopach, a **odchylenie magnetyczne** — w kineskopach. Układy odchylające powinny się charakteryzować liniowością odchylenia, dużą czułością odchylenia (duże odchylenie przy małym napięciu odchylającym) i małymi błędami odwzorowania.

Płytki odchylające mają różne kształty: płaskorównoległe, ukośne, łamane i profilowane. Dwie pary płytek płaskorównoległych mogą być oddalone od siebie (w oscyloskopie) lub mogą tworzyć ściany czworoboku.

Oprócz odchylenia elektrostatycznego jest stosowane odchylenie magnetyczne, którego układy przedstawiono na rys. 3.9. Na szyjce kineskopu, na



Rys. 3.9. Położenie na lampie magnetycznego układu odchylającego (cewek) [10]

jednym rdzeniu magnetycznym, są umieszczone dwie cewki odchylające, tworząc tzw. zespół odchylający. Sterując prądem cewek odchylających, uzyskujemy złożone pole magnetyczne, które z kolei steruje odchyłaniem wiązki elektronowej w płaszczyźnie poziomej i pionowej.

Błędy odchyłania układów odchylających stanowią: **dystorsja** (poduszko- wata lub beczkowata), **astygmatyzm**, **zakrzywienie pola** i **koma** oraz **błędy asymetrii** układów odchylających, które powstają podczas montażu (skręce- nie lub przesunięcie cewek odchylających względem siebie, nachylenie lub przesunięcie układu odchylającego względem osi). Zniekształcenia obrazu mogą być również spowodowane rozogniskowaniem wiązki przez układ od- chylający.

3.5. Luminofony

Luminofor jest to materiał krystaliczny, charakteryzujący się tym, że energia elektronów uderzających w niego jest zamieniana na energię świetlną (zjawisko to nosi nazwę **elektroluminescencji**). Zjawisko elektro- luminescencji zachodzi tak długo, dopóki elektrony pobudzają powierzchnię luminoforu. Z chwilą ustania pobudzenia, luminofor nadal emituje światło (zjawisko **fosforescencji**, zwane również **poświatą**), ale o malejącym z upły- wem czasu natężeniu. Zjawisko fosforescencji zanikające w bardzo krótkim

Tabela 3.1

Parametry i zastosowanie luminoforów [13]

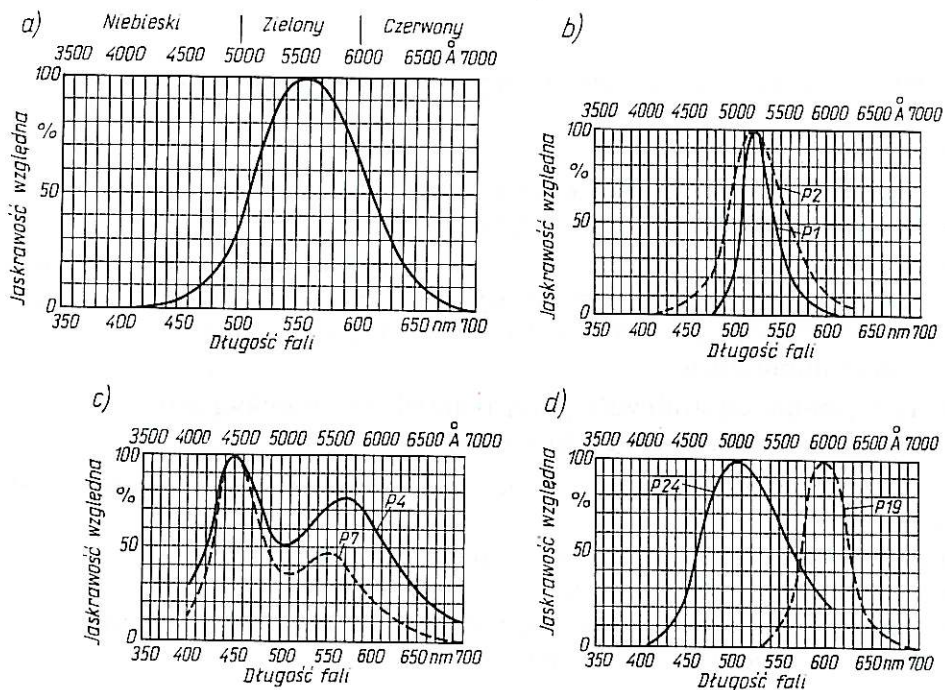
Zastosowanie	Luminofor		
	kolor świecenia	typ	poświata
Przebiegi oscyloskopowe o małej częstotliwości powtarzania	żółto-zielony	P1	średnia 20 ms
W oscyloskopach	żółto-zielony zielony	P2 P31	średnia 0.1 ms
Telewizja Telewizja kolorowa	biały trójkolorowy	P4 P22	średnio krótka
Fotografowanie z ekranu	niebieski	P5 P11	średnio krótka 40 μ s
Radar	żółto-zielony żółto-pomarańczowy pomarańczowy	P7 P14 P12 P19	długa 0.3 ÷ 4 s średnia długa 0.5 s 20 s
Układy z „latającą plamką”	fioletowy zielony	P16 P24	bardzo krótka <1 μ s krótka 2 μ s

czasie (kilku ps) nazywa się **fluorescencją**. Czas poświaty zależy od typu luminoforu i wynosi od 1 μ s do kilkunastu i więcej sekund. Luminofory o długim czasie poświaty są to dwa luminofory nałożone na siebie. W jednym zachodzi zjawisko elektroluminescencji, a w drugim **fotoluminescencji** (zjawisko świecenia w wyniku absorpcji promieniowania).

Kolor emitowanego światła zależy od składu chemicznego luminoforu (kolor zielony emitują *siarczany i krzemiany cynku*, kolor niebieski — *wolframiany kadmu lub potasu*).

W tabeli 3.1. przedstawiono rodzaje luminoforów i ich zastosowanie, a na rys. 3.10 — charakterystyki spektralne luminoforów oraz charakterystykę wrażliwości oka ludzkiego.

W celu poprawienia parametrów obrazu luminofor pokrywa się cienką warstwą metalu.



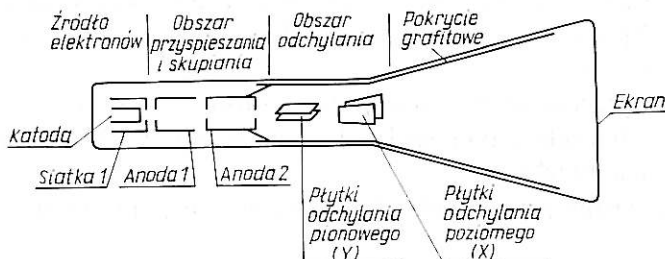
Rys. 3.10. Charakterystyki spektralne: a) wrażliwości oka ludzkiego; b), c), d) luminoforów [13]

3.6. Lampa oscyloskopowa

Lampa oscyloskopowa służy do odwzorowania przebiegu napięcia (najczęściej w funkcji czasu) **w postaci obrazu** (kształt przebiegu).

Lampa oscyloskopowa (rys. 3.11) jest zbudowana z wyrzutni elektronowej,

układu odchylającego i ekranu pokrytego luminoforem. Wiązka elektronowa, uformowana w wyrzutni elektronowej i odchylona przez układ odchylający, uderza w luminofor powodując jego świecenie i powstanie obrazu.



Rys. 3.11. Budowa lampy oscyloskopowej [13]

Najważniejszymi parametrami lampy oscyloskopowej z punktu widzenia użytkownika są:

- **wymiary ekranu;**
- **parametry wyrzutni elektronowej** (decydują o jakości rysowania);
- **zniekształcenia geometryczne** (patrz rozdz. 3.1);
- **współczynnik odchylania** (określany napięciem, które należy doprowadzić do płytek odchylania pionowego lub poziomego, aby odchylić wiązkę elektronową o 1 cm lub o 1 działkę na ekranie lampy);
- **rodzaj luminoforu;**
- **maksymalna częstotliwość pracy** (największa częstotliwość badanego sygnału, który może być oglądany na ekranie).

Oprócz jednostrumieniowych stosuje się również inne rodzaje lamp oscyloskopowych, np.:

- wielostrumieniowe (rzadko stosowane);
- z rozdzielonym strumieniem;
- pamiętające — zwane memotronami, których szczególną konstrukcją jest lampa ze zmiennym czasem poświaty.

3.7. Kineskop kolorowy

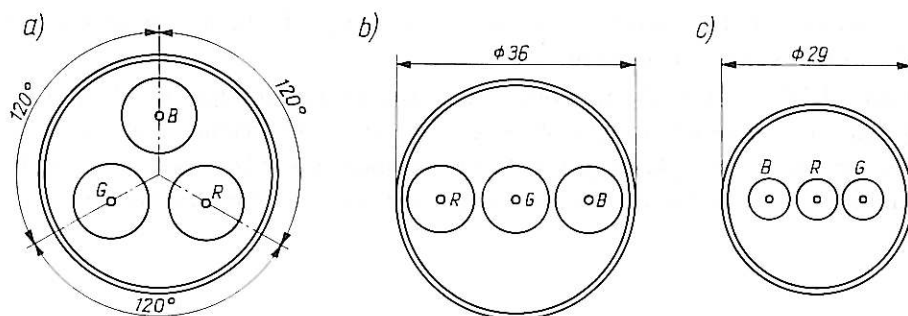
Kineskop, będący szczególnym rodzajem lampy obrazowej, służy do syntetyzowania obrazu, składającego się z pojedynczych punktów. Kineskop kolorowy (zwany również kineskopem maskowym) jest zbudowany z:

- trzech wyrzutni (dział) elektronowych, odpowiednio położonych między sobą;
- układu odchylającego trzy wiązki elektronowe;

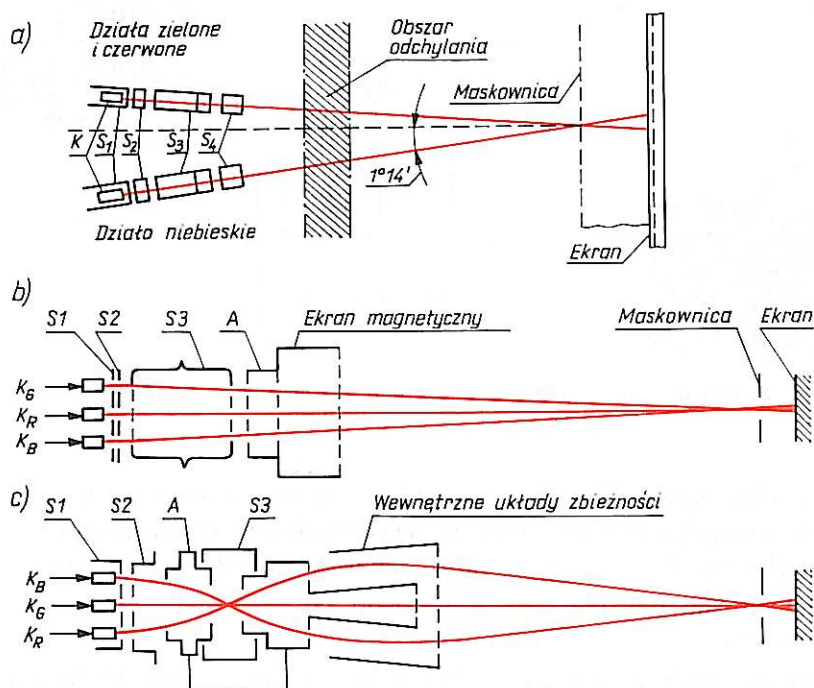
- maskownicy i ekranu, pokrytego trzema luminoforami o różnych barwach świecenia.

Wyrzutnie elektronowe są umieszczone w wierzchołkach trójkąta równobocznego (kineskop Δ — rys. 3.12a) lub w jednej linii (kineskop IL — rys. 3.12b lub PIL — rys. 3.12c, lub trynitron).

Wyrzutnie elektronowe w kineskopie Δ są umieszczone pod małym kątem względem osi kineskopu (rys. 3.13). **Maskownica** jest to cienka metalowa



Rys. 3.12. Rozmieszczenie dział elektronowych w szybie kineskopu: a) Δ ; b) IL; c) PIL [4]



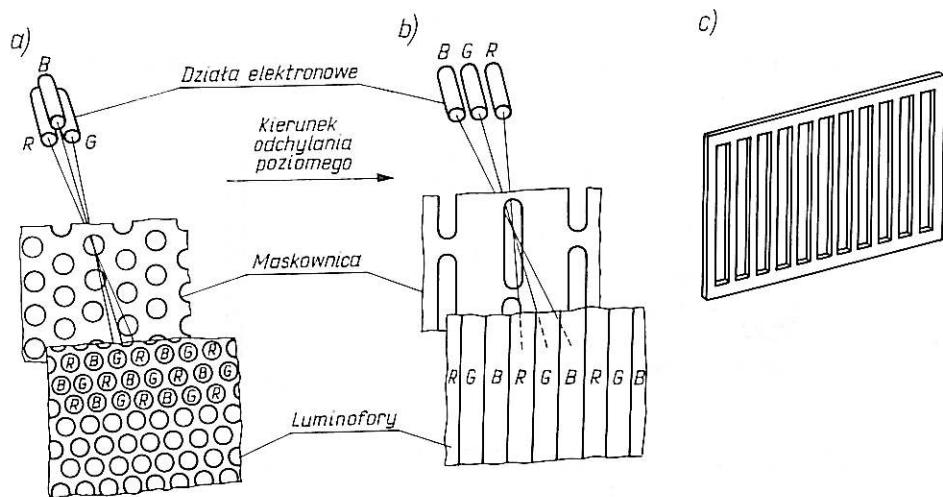
Rys. 3.13. Położenie względem siebie dział elektronowych i tory wiązek w kineskopie: a) Δ ; b) PIL; c) trynitron [4]

plyta z odpowiednio wyciętymi otworami. Otwory te mogą być okrągłe (kineskop Δ) lub w kształcie szczelin, krótkich i zaokrąglonych na końcach (kineskop IL), lub też o wysokości ekranu (kineskop trynitron). Na ekran są nakładane trzy rodzaje luminoforu:

- 1) czerwony,
- 2) niebieski,
- 3) zielony.

Pomiędzy poszczególnymi rodzajami luminoforów pozostawia się obszary wypełnione materiałem o dużym współczynniku pochłaniania światła, w celu polepszenia kontrastu obrazu.

Zasadę działania kineskopu kolorowego przedstawiono na rys. 3.14. Uformowane w wyrzutniach elektronowych wiązki są odchylane za pomocą jednego zespołu odchylającego i każda z nich pobudza określony rodzaj luminoforu (zapewnia to maskownica umieszczona przed ekranem).



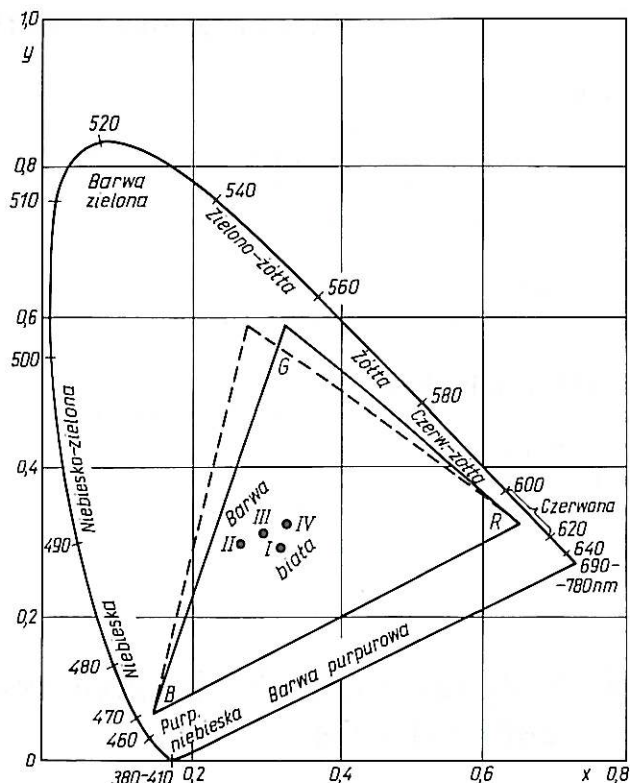
Rys. 3.14. Zasada działania kineskopu; a) Δ ; b) IL; c) maskownica kineskopu trynitron [4]

Poszczególne barwy na ekranie powstają w wyniku zmieszania w odpowiednich proporcjach trzech tzw. podstawowych kolorów: czerwonego (R — ang. Red), zielonego (G — ang. Green) i niebieskiego (B — ang. Blue).

Najważniejszymi parametrami kineskopu są:

- **jaskrawość**;
- **kontrast** (stosunek luminancji najjaśniejszej świecącej części ekranu do luminancji niepobudzonej części ekranu);
- **zakres barw** (kineskop odtwarza barwy z obszaru trójkąta — rys. 3.15);
- **rozdzielczość** (maksymalna liczba par linii odtwarzanych na ekranie).

Rys. 3.15. Barwy odtwarzane w kineskopie kolorowym [4]
W podkowie znajdują się barwy występujące w przyrodzie. W trójkącie znajdują się barwy odtwarzane przez kineskop kolorowy. Liczbami I, II, III, IV są oznaczone barwy białe, tylko jedną z nich odtwarza kineskop. Od rodzaju kineskopu zależy, z którego trójkąta będą odtwarzane barwy



Wadą kineskopu kolorowego jest jego bardzo mała jaskrawość i konieczność stosowania wysokiego napięcia anodowego (rzędu $20 \div 27$ kV).
Produkuje się kineskopy o maksymalnym kącie odchylenia 90° i 110° .

Pytania kontrolne:

1. Spróbuj znaleźć podobieństwa optyki elektronowej i świetlnej.
2. Z jakimi zjawiskami fizycznymi są związane błędy odwzorowania obrazu?
3. Czym różni się soczewka elektronowa od zwierciadła elektronowego?
4. Porównaj soczewkę przesłonową z katodową.
5. W jaki sposób jest zbudowana wyrzutnia elektronowa i jaką pełni funkcję?
6. Wymień różnice między układami odchylającymi elektrycznymi i magnetycznymi?
7. Jakie zjawiska zachodzą w luminoforze i czym się one różnią?
8. Jak jest zbudowana lampa oscyloskopowa?
9. Od czego zależą parametry lampy oscyloskopowej?
10. Czym różni się kineskop Δ od kineskopu IL?

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Fizyka:

- Podział materiałów pod względem przewodnictwa.
- Pole elektryczne i magnetyczne. Siłę Lorentza.
- Właściwości metali i dielektryków.
- Pojęcie stanu równowagi termodynamicznej.

Chemia:

- Budowę atomu oraz pojęcie powłoki elektronowej.

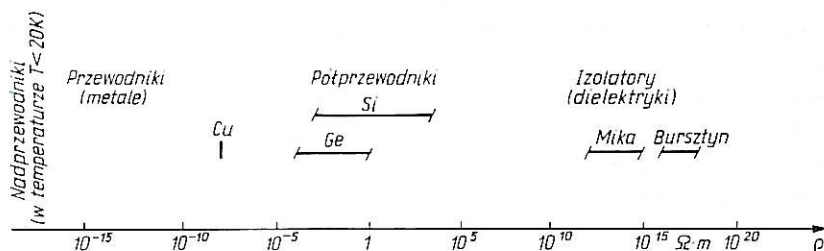
Elektrotechnika:

- Pojęcia: pasmo podstawowe, pasmo przewodnictwa i pasmo zabronione.
- Półprzewodnik typu P i N.
- Przepływ prądu w półprzewodniku.
- Model pasmowy półprzewodnika.

4. Półprzewodniki i zjawiska w nich zachodzące

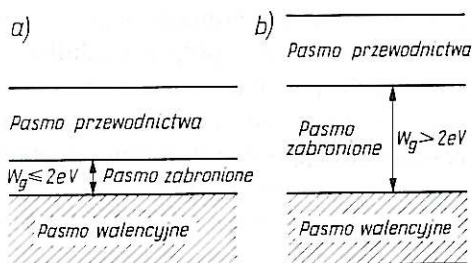
4.1. Co to jest półprzewodnik?

Półprzewodniki są materiałami powszechnie stosowanymi do produkcji elementów i układów elektronicznych. Każdy materiał (ciało stałe) ma pewną wartość rezystywności. W zależności od jej wartości (rys. 4.1) materiały dzielimy na metale i niemetale (dielektryk, półprzewodnik), różniące się właściwościami fizykochemicznymi. Różnica pomiędzy półprzewodnikiem a dielektrykiem jest umowna i dotyczy jedynie szerokości pasma zabro-



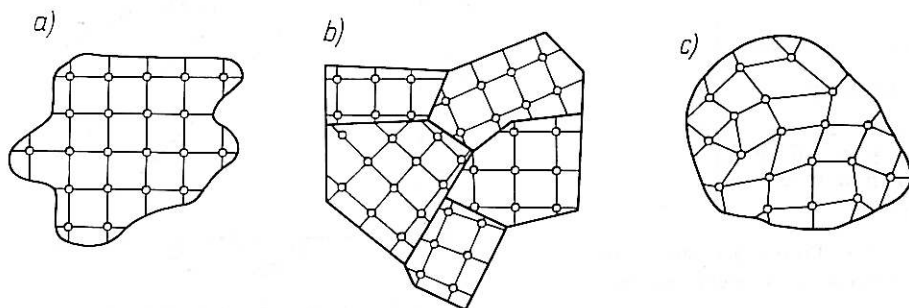
Rys. 4.1. Rezystywność materiałów elektronicznych [6]

nionego. Półprzewodniki mają **pasmo zabronione** o szerokości W_g mniejszej bądź równej 2 eV (rys. 4.2a), natomiast dielektryki — o szerokości większej niż 2 eV (rys. 4.2b). **Elektronowolt (eV) jest to energia, jaką uzyskuje elektron w wyniku zmiany swojego potencjału o 1 V** ($1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$). Temperaturowy współczynnik rezystancji półprzewodników przyjmuje wartość ujemną (wartość rezystancji maleje ze wzrostem temperatury półprzewodnika), a metali — dodatnią.



Rys. 4.2. Model pasmowy: a) półprzewodnika; b) dielektryka [6]

Powszechnie stosowanymi materiałami półprzewodnikowymi są: *krzem* i *german* (pierwiastki IV grupy układu okresowego Mendelejewa), *arsenek galu*, *fosforek galu*, *arsenofosforek galu* (związki pierwiastków III i V grupy). Materiały półprzewodnikowe są wytwarzane w postaci monokryształu, którego sieć krystaliczną przedstawiono na rys. 4.3a. Atomy w sieci są związane



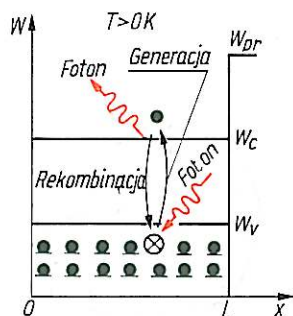
Rys. 4.3. Budowa sieci krystalicznej: a) monokryształu; b) polikryształu; c) ciała amorficznego [6]

wiązaniem kowalencyjnym. Oznacza to, że powłoki walencyjne (ostatnia orbita) tych atomów zachodzą na siebie. W związku z tym elektrony walencyjne sąsiadujących ze sobą atomów są jakby wspólne. Gdy zostanie zerwane wiązanie kowalencyjne, wówczas elektron staje się nośnikiem swobodnym, poruszającym się w kryształ. Wyrwanie elektronu z wiązania powoduje powstanie luki, którą nazywamy **dziurą**.

4.2. Półprzewodnik samoistny

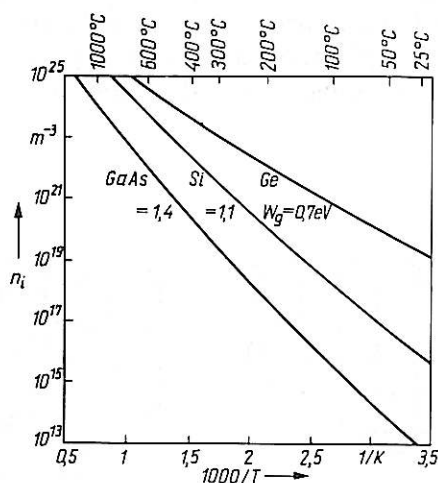
Półprzewodnik samoistny jest to monokryształ półprzewodnika pozbawionego defektów sieci krystalicznej i domieszek, czyli nie zawierający obcych atomów w sieci krystalicznej.

Jeżeli elektron zaabsorbuje kwant promieniowania elektromagnetycznego, to może przejść z pasma podstawowego do pasma przewodnictwa. Taki proces nazywa się **generacją pary elektron-dziura** (rys. 4.4). Liczba generowanych par — czyli ich koncentracja — jest tym większa, im jest węższe pasmo zabronione danego półprzewodnika oraz im temperatura monokryształu jest wyższa. Po pewnym czasie pobudzony elektron powraca do stanu podstawowego z wyemitowaniem kwantu promieniowania. Taki proces nazywamy **rekombinacją** lub rekombinacją promienistą (patrz rys. 4.4). **Średni czas, jaki upływa między procesem generacji a rekombinacji nazywamy czasem życia τ danego nośnika** (elektronu, dziury).



Rys. 4.4. Proces generacji i rekombinacji pary elektron-dziura [1]

W_V — wierzchołek pasma podstawowego, W_C — dno pasma przewodnictwa, W_{pr} — energia wyjścia elektronu z półprzewodnika

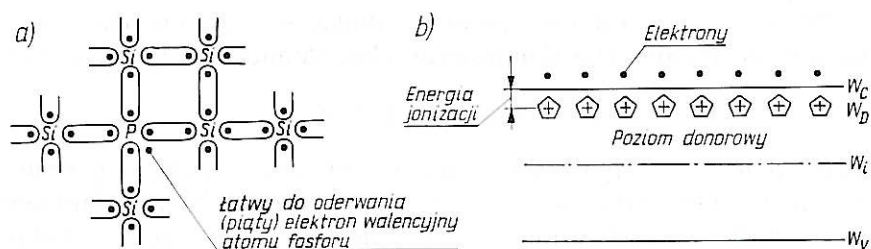


Rys. 4.5. Zależność koncentracji samoistnej półprzewodnika od temperatury [6]

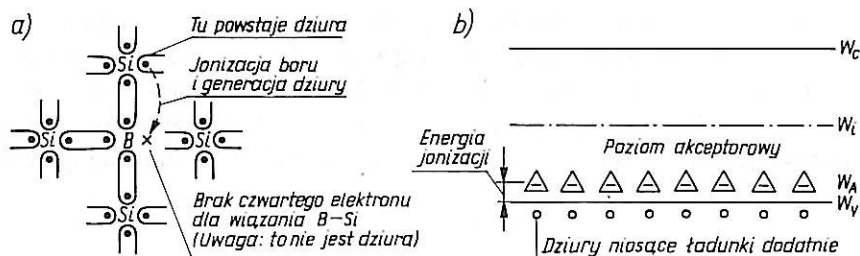
Ponieważ w półprzewodniku samoistnym mamy do czynienia z generacją par elektron-dziura, w związku z tym koncentracja elektronów i dziur jest taka sama i nosi nazwę koncentracji samoistnej. Zależność koncentracji samoistnej od temperatury przedstawia rys. 4.5, na którym jest również zaznaczona szerokość przerwy zabronionej danego półprzewodnika.

4.3. Półprzewodnik typu N i typu P (niesamoistny)

O półprzewodniku niesamoistnym mówimy wówczas, gdy w sieci krystalicznej monokryształu zamiast atomów pierwiastka materiału półprzewodnikowego znajduje się inny atom (np. w sieci krystalicznej krzemu znajduje się fosfor). Powstaje wówczas tzw. **półprzewodnik domieszkowany**, a ten inny atom nazywamy domieszką. Rozróżniamy dwa rodzaje domieszek: **donorową** i **akceptorową**. Na rysunkach 4.6 i 4.7 przedstawiono atom domieszki w sieci krystalicznej półprzewodnika i jego model pasmowy.



Rys. 4.6. Sieć krystaliczna półprzewodnika typu N (a) i jego model pasmowy (b) [6]
 W_D — energia poziomu donorowego, W_V — poziom samoistny



Rys. 4.7. Sieć krystaliczna półprzewodnika typu P (a) i jego model pasmowy (b) [6]
 W_A — energia poziomu akceptorowego

Półprzewodnik, w którego węzłach sieci krystalicznej znajdują się atomy V grupy układu okresowego (*fosfor, arsen, antymon, bizmut*) nazywa się **półprzewodnikiem typu N** (ang. *Negative*). Każdy atom domieszki ma pięć elektronów walencyjnych, z których cztery są związane z sąsiednimi atomami krzemu. Piąty elektron jest wolny i może być łatwo oderwany od atomu domieszki — jonizując ją dodatnio. Elektron przechodzi wówczas do pasma przewodnictwa półprzewodnika. Atomy domieszki w modelu pasmowym półprzewodnika znajdują się na tzw. poziomie donorowym, który występuje w pobliżu dna pasma przewodnictwa półprzewodnika (patrz rys. 4.6b).

Można przyjąć, że w temperaturze pokojowej wszystkie atomy domieszki są zjonizowane. Zatem, **koncentracja elektronów w półprzewodniku donorowym** jest równa sumie koncentracji atomów domieszki (N_D) i liczbie elektronów powstałych w wyniku generacji pary elektron-dziura. Natomiast **koncentracja dziur** jest równa liczbie elektronów powstałych w wyniku tej generacji.

$$n_n = N_D + n, \quad p_n = n.$$

Gdy półprzewodnik jest w stanie równowagi termodynamicznej, wówczas iloczyn koncentracji elektronów i dziur jest równy kwadratowi koncentracji samoistnej ($n_n p_n = n_i^2$). Jeżeli koncentracja domieszki będzie dużo większa od koncentracji samoistnej danego półprzewodnika, to wówczas mamy do czynienia z półprzewodnikiem donorowym silnie domieszkowanym, w którym

$$n_n \approx N_D, \quad p_n \approx n_i^2 / N_D.$$

Półprzewodnik, w którego węzłach sieci krystalicznej znajdują się atomy III grupy układu okresowego (*bor, aluminium, gal, ind*) nazywa się **półprzewodnikiem typu P** (ang. *Positive*). Atom takiej domieszki ma trzy elektrony walencyjne, związane z sąsiednimi atomami krzemu. Do wypełnienia czwartego wiązania sąsiadującego krzemu, brakuje w sieci krystalicznej jednego elektronu i może on być łatwo oderwany od innego atomu krzemu. Przechodzi on z pasma podstawowego półprzewodnika na poziom akceptorowy, jonizując tym samym ujemnie atom domieszki. Poziom akceptorowy znajduje się w pobliżu wierzchołka pasma podstawowego półprzewodnika (patrz rys. 4.7b). **Koncentracja dziur w półprzewodniku akceptorowym** jest równa sumie koncentracji atomów domieszki (N_A) i liczbie elektronów powstałych w wyniku generacji pary elektron-dziura. Natomiast **koncentracja elektronów** jest równa liczbie elektronów powstałych w wyniku tej generacji.

$$p_p = N_A + n, \quad n_p = n.$$

Gdy półprzewodnik jest w stanie równowagi termodynamicznej, wówczas iloczyn koncentracji elektronów i dziur jest równy kwadratowi koncentracji samoistnej ($p_p n_p = n_i^2$). Jeżeli koncentracja domieszki będzie dużo większa od koncentracji samoistnej danego półprzewodnika, to wówczas mamy do czynienia z półprzewodnikiem akceptorowym silnie domieszkowanym, w którym

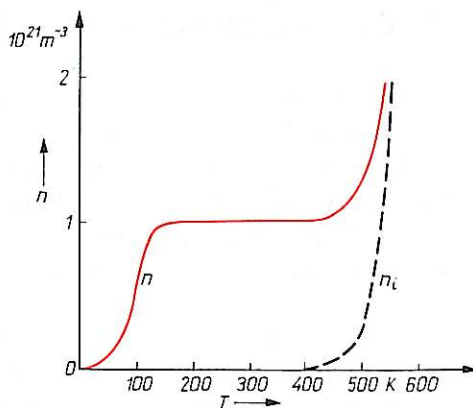
$$p_p \approx N_A, \quad n_p \approx n_i^2 / N_A.$$

Z powyższych rozważań wynika, że koncentracje dziur i elektronów są różne dla półprzewodnika typu N i P. W związku z tym, nośniki o większej koncentracji będziemy nazywać **nośnikami większościowymi**, a nośniki o mniejszej koncentracji — **mniejszościowymi**.

Koncentracja nośników dla danego typu półprzewodnika zmienia się w funkcji temperatury. Zmiany te nie mają charakteru liniowego w całym zakresie

Rys. 4.8. Zależność koncentracji nośników od temperatury [6]

n_i — wykres koncentracji samoistnej



temperatury ($0 \div 600 \text{ K}$), co ilustruje rys. 4.8. W przedziale od 0 do około 150 K, wzrost koncentracji jest związany ze wzrostem liczby zjonizowanych atomów domieszki (wzrasta energia cieplna sieci krystalicznej). Po zjonizowaniu wszystkich atomów domieszki, koncentracja utrzymuje się na stałym poziomie. Po osiągnięciu przez półprzewodnik temperatury ok. 450 K, koncentracja ponownie wzrasta, co jest wynikiem generacji termicznej par elektron-dziura (bezpośrednie przejście elektronu z pasma podstawowego do pasma przewodnictwa).

W tabeli 4.1. przedstawiono ważniejsze parametry elektrofizyczne podstawowych materiałów półprzewodnikowych.

Tabela 4.1

Podstawowe parametry materiałów półprzewodnikowych [6]

Parametr \ Materiał	Si	Ge	GaAs
Koncentracja atomów lub molekuł [m^{-3}]	$5 \cdot 10^{28}$	$4,42 \cdot 10^{28}$	$2,21 \cdot 10^{28}$
Szerokość pasma zabronionego [eV]	1,1	0,7	1,4
Koncentracja nośników samoistnych n_i [m^{-3}]	$1,45 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{19}$	10^{13}
Ruchliwość (dla półprzewodnika samoistnego): elektronów μ_n dziur μ_p [$\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$]	0,13 0,05	0,39 0,19	0,86 0,025
Względna przenikalność elektryczna ϵ_{rs}	11,7	16	12
Wytrzymałość na przebicie [$\text{V}/\mu\text{m}$]	30	8	35

4.4. Co dzieje się z nośnikiem w półprzewodniku?

Jak wiadomo w półprzewodniku znajdują się wygenerowane pary elektron-dziura i nośniki swobodne, powstające w wyniku jonizacji atomów domieszki. Jeżeli w jakimś miejscu półprzewodnika zostanie wygenerowanych więcej par (pary nadmiarowe), to będą one poddane procesowi dyfuzji. Koncentracja tych par jest największa w miejscu generacji, a im dalej w głąb półprzewodnika, tym ta koncentracja maleje do wartości koncentracji samejstnej. **Ruch nośników (par elektron-dziura) z obszaru o większej koncentracji do obszaru o mniejszej koncentracji nazywamy dyfuzją.** Jeżeli podczas dyfuzji nośnik zderza się z innym elektronem lub atomem sieci krystalicznej, to średnią drogę, jaką przebywa on między tymi zderzeniami, nazywamy **drogą swobodną**.

Ilościowy opis procesu dyfuzji określa tzw. **prąd dyfuzyjny**, wyrażony wzorem

$$I_n = qSD_n \frac{dn}{dx} \quad \text{dla elektronów,}$$

$$I_p = -qSD_p \frac{dp}{dx} \quad \text{dla dziur,}$$

przy czym: D_n, D_p — współczynnik dyfuzji par elektron-dziura; q — ładunek; S — powierzchnia, przez którą przepływa prąd, $\frac{dn}{dx}$ i $\frac{dp}{dx}$ — zmiana rozkładu koncentracji nośników.

Odległość, przy której koncentracja nośników maleje e -krotnie, nazywa się **drogą dyfuzji** $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ (dla elektronów); τ_n — czas życia elektronów. Jeżeli na półprzewodnik będzie oddziaływało zewnętrzne pole elektryczne o natężeniu E , to nośniki będą poruszały się w kierunku działania tego pola. Taki ukierunkowany ruch nośników nazywamy **prądem unoszenia** i wyrażamy wzorem

$$I_n = qS\mu_n n E \quad \text{dla elektronów,}$$

$$I_p = qS\mu_p p E \quad \text{dla dziur,}$$

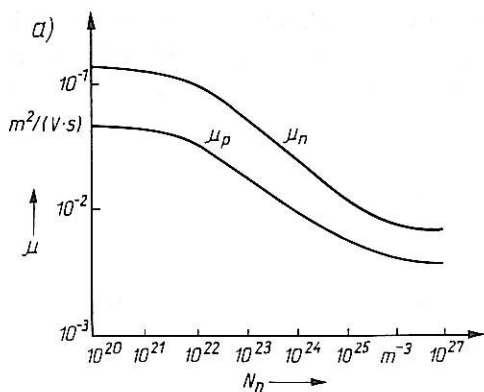
przy czym μ_n, μ_p — **ruchliwość** elektronów, dziur.

Między ruchliwością i współczynnikiem dyfuzji istnieje ścisły związek

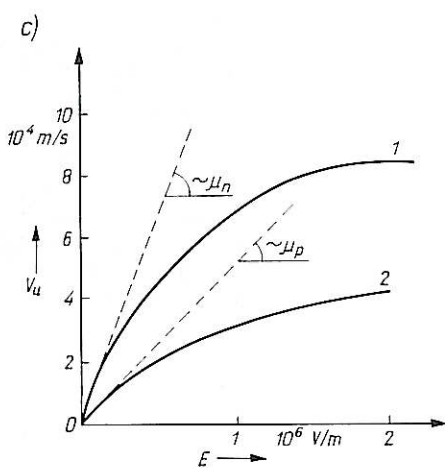
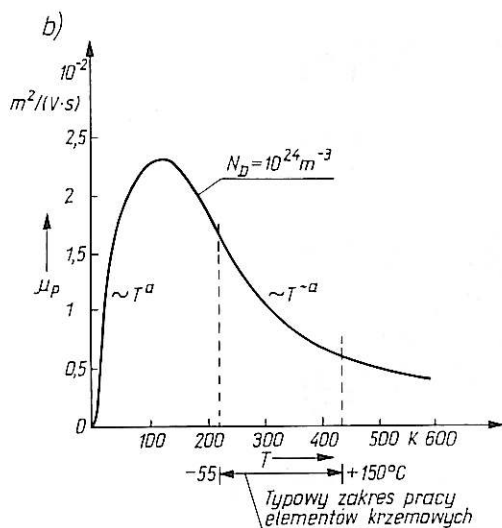
$$D/\mu = kT/q \quad (\text{wzór Einsteina}),$$

w którym: k — stała Boltzmanna, T — temperatura.

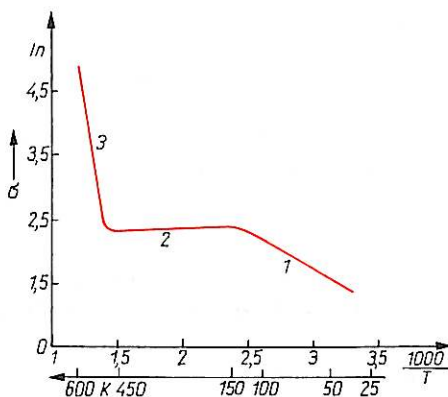
Wartość ruchliwości zależy od: koncentracji domieszek (rys. 4.9a), temperatury (rys. 4.9b) i natężenia pola elektrycznego (rys. 4.9c). Wyrażenie $qn\mu_n$ lub (i) $qp\mu_p$ nazywamy **konduktywnością** danego typu półprzewodnika i oznaczamy symbolem σ . Charakter zmian wartości konduktywności w funkcji temperatury ilustruje rys. 4.10. Wartość konduktywności zwiększa się wraz ze



Rys. 4.9. Zależność ruchliwości nośników:
a) od koncentracji domieszek; b) od temperatury; c) zależność prędkości unoszenia od natężenia pola elektrycznego [6]
 μ_n — ruchliwość elektronów, μ_p — ruchliwość dziur, v_u — prędkość unoszenia nośnika



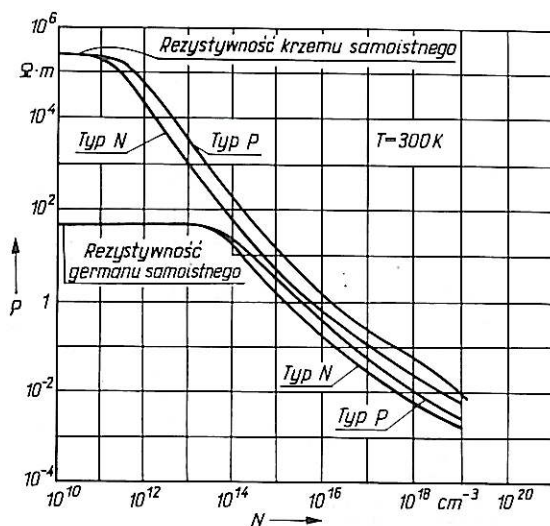
Rys. 4.10. Zależność konduktywności półprzewodnika od temperatury [6]
1, 2 — półprzewodnik niesamoistny, 3 — półprzewodnik samoistny



wzrostem temperatury, oraz wraz ze wzrostem koncentracji domieszek. Odwrotnością konduktywności ($1/\sigma$) jest **rezystywność** — ρ . Zależność rezystywności od koncentracji domieszek przedstawia rys. 4.11, a jej zmiany w funkcji temperatury określa zależność

$$\rho = AT^b \exp\left(\frac{W_g}{2kT}\right),$$

przy czym: A , b — stałe związane z rodzajem materiału, W_g — szerokość pasma zabronionego w półprzewodniku.



Rys. 4.11. Zależność rezystywności półprzewodnika od koncentracji domieszek [15]

Jeżeli w półprzewodniku występuje dyfuzja i unoszenie, to prąd przez niego płynący jest równy sumie prądów składowych prądu elektronowego i prądu dziurowego

$$I = qS\mu_n nE + qSD_n \frac{dn}{dx} + qS\mu_p pE - qSD_p \frac{dp}{dx}.$$

Oprócz prądów: dyfuzyjnego i unoszenia, w półprzewodniku powstaje również prąd termokinetyczny. **Jeśli w płaszczyźnie półprzewodnika występują dwa strumienie nośników przeciwnie skierowane, to tworzą one właśnie prądy termokinetyczne.**

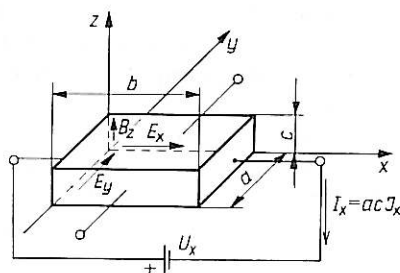
Półprzewodnik, w którym przepływ prądu odbywa się w wyniku ruchu nośników większościowych i mniejszościowych nazywamy **bipolarnym**. Półprzewodnik, w którym za przepływ prądu są odpowiedzialne nośniki jednego rodzaju (elektrony lub dziury) nazywamy **unipolarnym**.

4.5. Zjawiska Halla i Gaussa

Zjawiska Halla i Gaussa wskazują na wpływ pola magnetycznego na ruch nośników swobodnych, a tym samym na parametry materiału półprzewodnikowego. Jeżeli na nośnik — oprócz pola elektrycznego, powstałego w wyniku doprowadzenia napięcia z zewnątrz — działa pole magnetyczne, to tor tego nośnika zostaje odchylony pod wpływem tzw. siły Lorentza. Nośniki gromadzą się przy jednej krawędzi półprzewodnika, co prowadzi do powstania dodatkowego poprzecznego pola elektrycznego (rys. 4.12). Opisany proces określamy mianem **zjawiska Halla**.

Rys. 4.12. Zjawisko Halla [15]

U_x — napięcie zewnętrzne, I_x — prąd płynący przez półprzewodnik, w wyniku doprowadzenia napięcia U_x , E_x — natężenie pola elektrycznego, E_y — natężenie pola powstałego w wyniku działania na półprzewodnik pola magnetycznego o indukcji B_z , a, b, c — wymiary półprzewodnika



Natężenie powstałego pola

$$E_y = R_H J_x B_z,$$

przy czym: $R_H = -\frac{3\pi}{8q} \frac{nb^2 - p}{(nb + p)^2}$ — współczynnik Halla [cm^3/C], n i p — koncentracje elektronów i dziur w półprzewodniku, $b = \mu_n/\mu_p$, J_x — gęstość prądu płynącego przez półprzewodnik w wyniku przyłożenia z zewnątrz napięcia U_x , B_z — indukcja pola magnetycznego.

Powstanie poprzecznego pola powoduje obrócenie wypadkowego pola elektrycznego w półprzewodniku o kąt Halla ($\tan \Phi = E_y/E_x$). Wartość i zwrot tego pola zależą od wartości współczynnika Halla, który z kolei zależy od koncentracji nośników i ich ruchliwości.

Zjawisko Gaussa polega na zmianie (zwiększeniu) rezystywności półprzewodnika pod wpływem działania pola magnetycznego. Zwiększanie się wartości rezystywności jest spowodowane wzrostem liczby zderzeń nośników, których prędkości różnią się od prędkości średniej. W wyniku działania poprzecznego pola, tory nośników zakrzywiają się w mniejszym bądź w większym stopniu, ponieważ pole to kompensuje działanie siły Lorentza tylko dla nośników o średniej prędkości. Jeżeli na półprzewodnik silnie domieszkowany działa pole magnetyczne o małej indukcji ($\mu B \ll 1$), to zmiana rezystywności takiego półprzewodnika dana jest wzorem

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \left[\frac{3\pi}{8} \right]^2 \left[\frac{4}{\pi} - 1 \right] (\mu B)^2 \approx 0,38 (\mu B)^2,$$

w którym ρ_0 jest rezystywnością przy indukcji równej zero.

Natomiast gdy na półprzewodnik działa pole magnetyczne o dużym natężeniu, wówczas zmiana rezystywności jest określona wzorem

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{AB^2}{1 + \mu^2 B^2},$$

w którym A jest stałą, zależną od rodzaju półprzewodnika.

Pytania kontrolne:

1. Co to jest półprzewodnik?
2. Jaka jest różnica między półprzewodnikiem i dielektrykiem?
3. Czym różni się półprzewodnik samoistny od domieszkowanego?
4. Czy istnieje związek między czasem życia nośników a generacją i rekombinacją?
5. Wymień różnice między półprzewodnikiem typu N i półprzewodnikiem typu P.
6. Czym różni się prąd dyfuzyjny od prądu unoszenia?
7. Jakie zjawiska zachodzą w półprzewodniku?
8. Jakie czynniki i w jaki sposób wpływają na wartość rezystywności półprzewodnika?
9. Na czym polega zjawisko Halla i zjawisko Gaussa?
10. Wyznacz koncentrację dziur i elektronów w krzemie i germanie, jeśli koncentracja domieszki wynosi:
a) 10^{23} m^{-3} ; b) 10^{20} m^{-3} ; c) $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$.
Jakie wnioski można wysunąć na podstawie uzyskanych wyników?
11. Oblicz konduktywność krzemu i germanu, jeżeli koncentracja domieszek wynosi:
a) $5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$; b) 10^{21} m^{-3} ; c) 10^{22} m^{-3} .
Jakie wnioski można wysnuć na podstawie uzyskanych wyników?
12. Oblicz drogę dyfuzji nośników w krzemie i germanie, jeśli ich czas życia wynosi:
a) 10^{-6} s ; b) $8 \times 10^{-5} \text{ s}$; c) $2 \times 10^{-6} \text{ s}$.
Jakie wnioski można wysnuć na podstawie uzyskanych wyników?

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Matematyka:

- Pojęcie logarytmu.

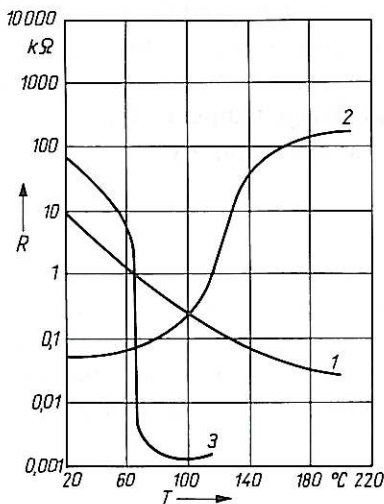
Elektronika:

- Wpływ temperatury na rezystywność półprzewodnika (rozdz. 4.4).
- Na czym polega zjawisko Halla i zjawisko Gaussa (rozdz. 4.5.).

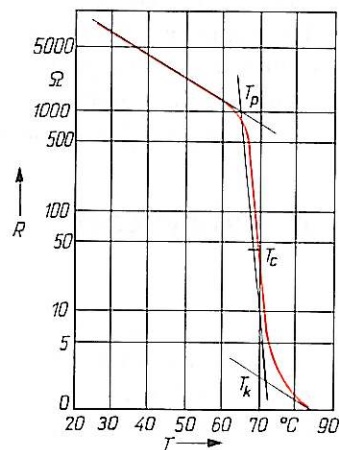
5. Półprzewodnikowe elementy bierne

5.1. Termistory

Termistor jest elementem półprzewodnikowym, którego rezystancja zależy od temperatury. Zmiana wartości rezystancji może nastąpić na skutek wzrostu temperatury otoczenia termistora lub (i) wydzielanego w nim ciepła. W zależności od charakteru tej zmiany rozróżniamy termistory o ujemnym (NTC — ang. *Negative Temperature Coefficient*) i dodatnim (PTC — ang. *Positive Temperature Coefficient*) współczynniku temperaturowym rezystancji oraz o skokowej zmianie rezystancji (CTR — ang. *Critical Temperature Resistor*) — rys. 5.1.



Rys. 5.1. Charakterystyki rezystancyjno-temperaturowe termistorów [2]
1 — termistora NTC, 2 — termistora PTC,
3 — termistora CTR

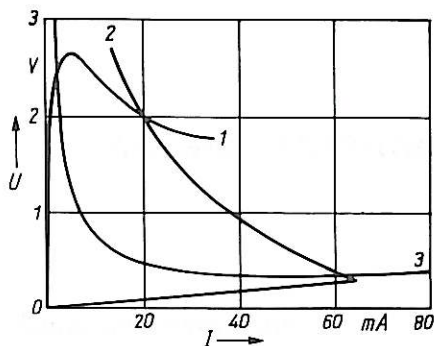


Rys. 5.2. Wyznaczanie temperatury krytycznej termistora [2]

Najważniejszymi parametrami termistora są:

- **rezystancja nominalna** (wartość rezystancji termistora w temperaturze 25°C; wynosi ona od pojedynczych omów do kilku megaomów);
- **temperaturowy współczynnik rezystancji** ($\alpha_T = -W_g/2kT^2$).

Dla termistorów CTR podaje się temperaturę krytyczną $T_c = (T_p + T_k)/2$, przy której następuje skok wartości rezystancji (rys. 5.2), oraz tzw. parametr $\Phi = \lg(R_{Tp}/R_{Tk})$.



Rys. 5.3. Charakterystyki napięciowo-prądowe termistorów [2]
1 — termistora NTC, 2 — termistora PTC, 3 — termistora CTR

Na przykład termistory NTC mają następujące parametry:

- rezystancja nominalna wynosi od 2,2 Ω do 470 k Ω ;
- tolerancja, w zależności od sposobu wykonania termistora, wynosi $\pm 10\%$ lub $\pm 20\%$;
- temperaturowy współczynnik rezystancji, określony w temperaturze 25°C, wynosi od $-4,85$ do $-3\%/K$ z tolerancją $\pm 5\%$ (termistor NTC501 ma tolerancję $\pm 2\%$);
- dopuszczalna moc, która zależy od wykonania termistora, wynosi od 4,5 do 1500 mW.

Charakterystykę napięciowo-prądową termistora przedstawiono na rys. 5.3. Termistory są to elementy wykonane ze spieków sproszkowanych tlenków takich metali, jak np.: *miedź, glin, żelazo, mangan, kobalt*. Stosuje się je:

- do pomiarów: temperatury metodą oporową, mocy w zakresie mikrofal, ciśnienia gazów, poziomu cieczy;
- w układach sygnalizacji, regulacji i stabilizacji temperatury;
- do kompensacji temperaturowej układów elektronicznych.

5.2. Warystory

Warystory są to rezystory wykonane z półprzewodnika, których rezystancja zależy od napięcia doprowadzonego do ich zacisków (maleje ze wzrostem wartości napięcia). Warystory mają nieliniową charakterystykę napięciowo-prądową — rys. 5.4 (wartość prądu nie zależy od kierunku przyłożonego napięcia), którą określa wzór

$$U = DI^\beta,$$

w którym: U — napięcie doprowadzone do warystora, I — prąd płynący przez warystor, D — rezystancja, której wartość jest równa spadkowi napięcia na warystorze w wyniku przepływu prądu stałego o wartości 1 A, β — współczynnik nieliniowości.

Parametrami charakterystycznymi warystora są:

- **współczynnik nieliniowości** — β , wyznaczany na podstawie pomiaru spadków napięć (U_1 , U_2), wywołanych różnymi prądami (I_1 , I_2),

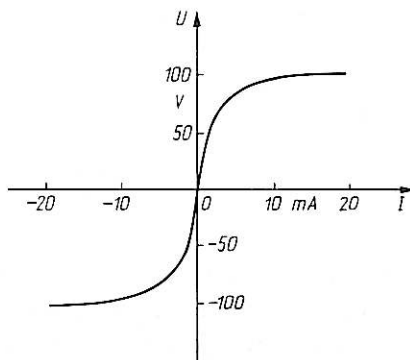
$$\beta = \frac{\lg U_1 - \lg U_2}{\lg I_1 - \lg I_2} = \frac{\lg U_1/U_2}{\lg I_1/I_2};$$

jeżeli $I_1/I_2 = 10$, to $\beta = \lg \frac{U_1}{U_2}$;

wartość β zależy od materiału i technologii wykonania warystora;

- **napięcie charakterystyczne** — spadek napięcia na warystorze, określany dla stałej wartości prądu płynącego przez niego;
- **moc znamionowa**.

W tabeli 5.1 przedstawiono dwa typy warystorów i ich najważniejsze parametry.



Rys. 5.4. Charakterystyka napięciowo-prądowa warystora [15]

Parametry warystorów

Tabela 5.1

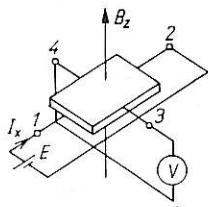
Warystor	Parametr		
	β	moc znamionowa [W]	napięcie charakterystyczne [V]
walcowy	$0,18 \pm 0,25$ lub $0,14 \pm 0,21$	0,8	$470 \div 1300$
dyskowy	$0,18 \pm 0,25$ lub $0,14 \pm 0,22$	0,5	do 100

Warystory są wykonywane najczęściej jako spiek węglika krzemu (*karborund*) o kształcie walcowym i dyskowym. Do ich cechowania najczęściej używa się kodu barwnego.

Warystory są stosowane przede wszystkim jako ograniczniki napięcia (w układach zabezpieczających przed przepięciami lub do zabezpieczania styków), jako elementy stabilizujące napięcie, w filtrach, w układach przetworników częstotliwości.

5.3. Hallotrony

Hallotron jest elementem półprzewodnikowym wykorzystującym zjawisko Halla, zwany jest on także generatorem Halla lub czujnikiem Halla. Zasadę jego działania przedstawiono na rys. 5.5. Przez płytkę półprzewod-



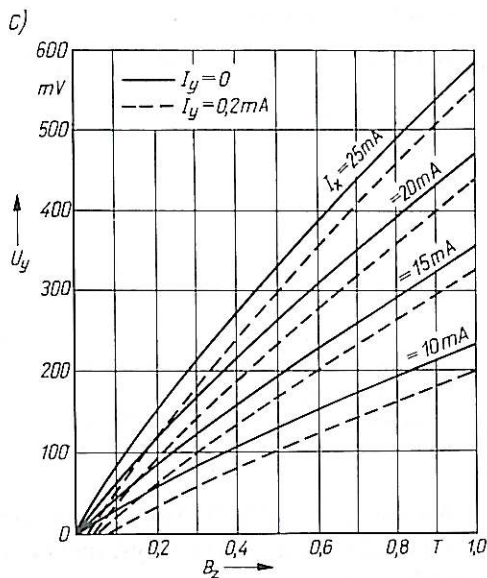
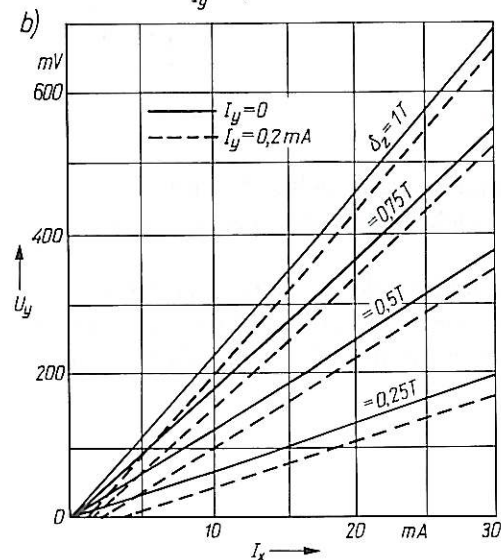
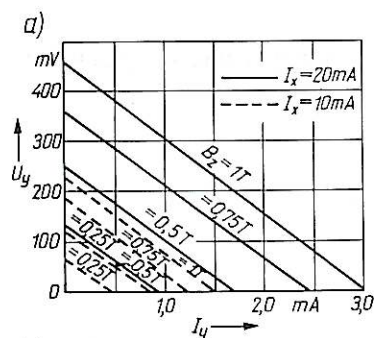
Rys. 5.5. Zasada działania hallotronu [2]

E — napięcie zewnętrzne, I_x — prąd płynący w wyniku przyłożonego napięcia zewnętrznego, B_z — indukcja pola magnetycznego, 1, 2, 3, 4 — wyprowadzenia

nika (między elektrodą 1 i 2) płynie prąd sterujący I_x . W wyniku działającego na nią prostopadłego pola magnetycznego o indukcji B_z , między elektrodą 3 i 4 powstaje napięcie Halla.

Do **charakterystyk statycznych hallotronów** należą:

- charakterystyka wyjściowa (zależność napięcia wyjściowego od prądu wyjściowego) — rys. 5.6a;



Rys. 5.6. Charakterystyki statyczne hallotronu: a) wyjściowa; b) oddziaływania prądu sterującego; c) oddziaływania pola magnetycznego [15]

- charakterystyka oddziaływania prądu sterującego (zależność napięcia wyjściowego od prądu sterującego) — rys. 5.6b;
- charakterystyka oddziaływania pola magnetycznego (zależność napięcia wyjściowego od indukcji magnetycznej) — rys. 5.6c.

Czułości hallotronów prądową i polową wyznaczają odpowiednio: stopień oddziaływania prądu sterującego i pola magnetycznego na napięcie wyjściowe.

Hallotrony są wykonywane z mono- i polikryształu półprzewodnikowego lub w postaci cienkiej warstwy naniesionej na mikę lub szkło. Materiałami najczęściej stosowanymi są: *krzem*, *german*, *arsenek* lub *antymonek indu*, *tellurek* lub *selenek rtęci*.

Hallotrony stosuje się między innymi w: podzespołach biernych do pomiaru natężenia pola magnetycznego, układach współpracujących z magnesami trwałymi do pomiaru regulacji i stabilizacji pola magnetycznego, przesunięć mechanicznych, żyratorach, detektorach fazy, analizatorach harmonicznym oraz jako wyłączniki bezkontaktowe.

5.4. Gaussotrony

Gaussotron nosi nazwę magnetorezystora, a jego działanie opiera się na zjawisku Gaussa. Materiałami stosowanymi do produkcji gaussotronów są półprzewodniki o dużych ruchliwościach nośników (*arsenek galu*, *tellurek rtęci*, *arsenek indu*, *antymonek indu*).

Są one wykonywane w podobny sposób jak hallotrony.

Gaussotrony są stosowane przede wszystkim w automatyce przemysłowej i do pomiaru silnych pól magnetycznych.

Pytania kontrolne:

1. Czym różni się termistor NTC od PTC?
2. Jaka jest różnica między termistorem a warystorem?
3. Porównaj zasadę działania hallotronu i gaussotronu.
4. Gdzie są stosowane hallotrony, a gdzie gaussotrony?

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Fizyka:

- Na czym polega proces dyfuzji.

Elektronika:

- Co to jest półprzewodnik typu N i typu P (rozdz. 4.3).
- Jakie rodzaje nośników występują w półprzewodniku (rozdz. 4.3).
- Na czym polega proces unoszenia (rozdz. 4.4).
- Co to jest prąd termokinetyczny (rozdz. 4.4).

6. Złącze PN

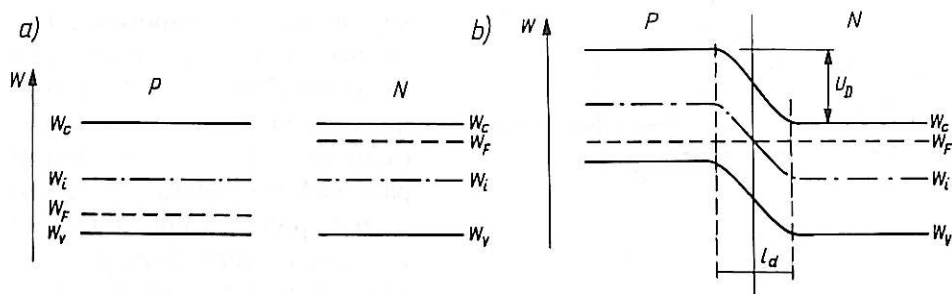
6.1. Rodzaje złączy

Połączenie się dwóch kryształów (monokryształów) ciała stałego (półprzewodnik, metal) w ten sposób, że tworzą one ścisły kontakt nazywamy złączem. Złącza mogą być następujące: metal-metal, półprzewodnik-półprzewodnik, dielektryk-dielektryk, metal-półprzewodnik oraz dielektryk-półprzewodnik. W elektronice najczęściej są wykorzystywane złącza metal-półprzewodnik i półprzewodnik-półprzewodnik. Te ostatnie mogą być wykonywane jako heterozłącza (złącze powstałe w wyniku połączenia monokryształu krzemu i germanu) lub homozłącza (złącze wykonane w jednym monokryształe półprzewodnika, przy czym obszary złącza mają różne koncentracje domieszek), czyli złącze powstałe w wyniku połączenia półprzewodnika typu N i typu P (złącze PN).

6.2. Tworzenie się warstwy zaporowej w złączu PN. Model pasmowy złącza

W momencie zetknięcia się półprzewodnika typu P i typu N, w wyniku procesu dyfuzji popłyną prądy termokinetyczne. Elektrony (nośniki większościowe) będą przechodziły z półprzewodnika typu N do P, natomiast dziury (też nośniki większościowe) — z P do N. Na skutek dyfuzyjnego przepływu nośników, w obszarze przyzłączowym (obszar styku półprzewodnika P i N) tworzą się nieskompensowane ładunki (w półprzewodniku typu N — ładunek dodatni, a w półprzewodniku typu P — ładunek ujemny). W związku z tym, w obszarze złącza (w wyniku dyfuzji) powstaje różnica potencjałów, która tworzy **barierę energetyczną** (napięcie na barierze nosi nazwę **napięcia dyfuzyjnego** — U_D). Bariera przeciwdziała dalszej dyfuzji

nośników większościowych. Powstała w ten sposób warstwa jest nazywana często **warstwą zaporową** lub warstwą ładunku przestrzennego, ewentualnie warstwą zubożoną. Natomiast obszary półprzewodnika typu N i P, objęte obszarem warstwy zaporowej — nazywa się obszarami przyłączowymi. Model pasmowy złącza przedstawiono na rys. 6.1. Szerokość warstwy zaporowej zależy od wartości napięcia dyfuzyjnego i koncentracji domieszek w obu obszarach półprzewodnika (N_A , N_D), jak również od tego, czy złącze jest liniowe, czy też skokowe.



Rys. 6.1. Model pasmowy złącza przed utworzeniem (a) i po utworzeniu (b) [6]
N, P — typ półprzewodnika, W_V — wierzchołek pasma podstawowego, W_C — dno pasma przewodnictwa, W_F — poziom Fermiego, W_i — poziom samoistny, l_d — szerokość warstwy zaporowej, U_D — napięcie dyfuzyjne

6.3. Polaryzacja złącza

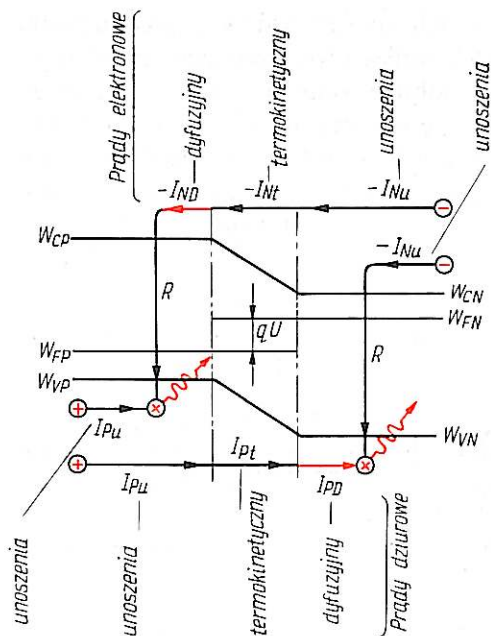
6.3.1. Polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia

Przez pojęcie polaryzacji rozumiemy stan, jaki następuje w złączu pod wpływem przyłożenia z zewnątrz różnych potencjałów do obydwu obszarów półprzewodnika. **Jeżeli do półprzewodnika typu P przyłożymy potencjał dodatni, a do półprzewodnika typu N — potencjał ujemny, to mówimy, że złącze jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia.** Powstała bariera energetyczna, zmniejszona o wartość napięcia zewnętrznego

$$U_F = U_D - U,$$

przy czym: U — napięcie zewnętrzne, U_D — napięcie dyfuzyjne.

Na rysunku 6.2. przedstawiono przepływ prądów w złączu spolaryzowanym w kierunku przewodzenia. Rozpatrzmy to na przykładzie przepływu elektronów przez złącze. Elektrony przechodzą z kontaktu do obszaru półprzewodnika typu N, gdzie zaczynają poruszać się w stronę złącza (brzegu warstwy zaporowej). Ilościowo opisuje to prąd unoszenia. Praktycznie całe napięcie przyłożone do złącza odkłada się w warstwie zaporowej. W związku z tym na elektron, znajdujący się w pobliżu złącza, działa duża siła umożliwiająca swobodne przejście nośnika przez warstwę zaporową. Prąd unoszenia prze-



Rys. 6.2. Przepływ prądów w złączu spolaryzowanym w kierunku przewodzenia [1]

W_{VP} , W_{VN} — wierzchołek pasma podstawowego w półprzewodniku typu P i N, W_{CP} , W_{CN} — dno pasma przewodnictwa w półprzewodniku typu P i N, W_{FP} , W_{FN} — poziom Fermiego w półprzewodniku typu P i N, U — napięcie przykładane do złącza, R — rekombinacja

kształca się w prąd termokinetyczny, czyli przechodzącym elektronom w jednym kierunku złącza, towarzyszy przejście dziur w kierunku odwrotnym. Po przejściu przez warstwę zaporową elektron z nośnika większościowego staje się nośnikiem mniejszościowym. Po drugiej stronie warstwy zaporowej każdy elektron tworzy z dziurą parę elektron-dziura, a prąd termokinetyczny przekształca się w prąd dyfuzyjny. W wyniku dyfuzji, pary elektron-dziura przechodzą w głąb półprzewodnika typu P. Do czasu rekombinacji pary, płynie prąd dyfuzyjny, który staje się następnie prądem unoszenia. W analogiczny sposób odbywa się ruch dziury od kontaktu przez obszar półprzewodnika typu P, przez warstwę zaporową i półprzewodnik typu N.

Całkowity prąd płynący przez złącze

$$I = qS \left[n_p \frac{D_n}{L_n} + p_n \frac{D_p}{L_p} \right] [\exp(qU/kT) - 1]$$

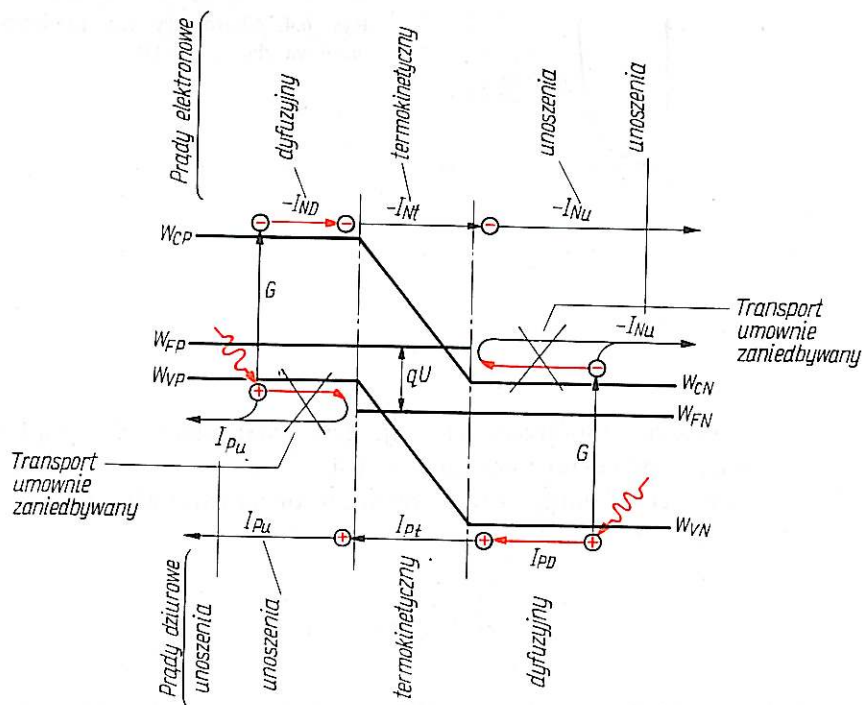
jest prądem nośników większościowych.

6.3.2. Polaryzacja złącza w kierunku zaporowym

O polaryzacji złącza w kierunku zaporowym mówimy wtedy, kiedy do półprzewodnika typu N przyłożymy potencjał wyższy (plus), a do półprzewodnika typu P — niższy (minus). Bariera energetyczna tego złącza, zwiększona o wartość napięcia zewnętrznego

$$U_R = U + U_D.$$

Na rysunku 6.3 przedstawiono model przepływu prądu w złączu spolaryzowanym w kierunku zaporowym. Przepływ prądu rozpatrzmy na następującym przykładzie. W pobliżu warstwy zaporowej półprzewodnika typu P, elektron absorbuje kwant promieniowania elektromagnetycznego, następuje



Rys. 6.3. Przepływ prądów w złączu spolaryzowanym w kierunku zaporowym [1]
 U — napięcie przykładane do złącza, G — generacja

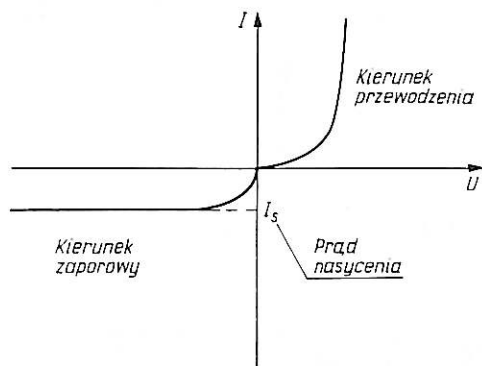
generacja termiczna pary elektron-dziura. Para ta jest transportowana na brzeg warstwy zaporowej przez prąd dyfuzyjny. Całe napięcie przyłożone do półprzewodnika odkłada się w warstwie zaporowej, na elektron w parze działa więc duża siła, powodując jej rozerwanie. Elektron przechodzi wówczas swobodnie przez warstwę zaporową (prąd dyfuzyjny zamienia się w prąd termokinetyczny) i z nośnika mniejszościowego staje się większościowym. Po drugiej stronie warstwy zaporowej, elektron, jako nośnik swobodny, porusza się w stronę kontaktu. Prąd termokinetyczny przekształca się w prąd unoszenia. Dziura, która została w półprzewodniku typu P, staje się nośnikiem większościowym (nadmiarowym), dostarczany do kontaktu przez prąd unoszenia.

Całkowity prąd płynący przez złącze

$$I = qS \left[n_p \frac{D_n}{L_n} + p_n \frac{D_p}{L_p} \right] [\exp(qU/kT) - 1]$$

jest prądem nośników mniejszościowych.

Wzór na całkowity prąd płynący przez złącze w kierunku przewodzenia i zaporowym jest taki sam, a więc jest to wzór ogólny. Wykreślenie tej



Rys. 6.4. Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza PN [1]

zależności w układzie współrzędnych daje tzw. charakterystykę prądowo-napięciową złącza, przedstawioną na rys. 6.4.

Przy dużych wartościach napięcia wstecznego, wzór na całkowity prąd w złączu sprowadza się do postaci

$$I_s = qS \left[n_p \frac{D_n}{L_n} + p_n \frac{D_p}{L_p} \right]$$

i jest określany jako **prąd nasycenia złącza**. Prąd ten jest tym mniejszy, im jest szersze pasmo zabronione danego półprzewodnika. Wartość prądu nasycenia jest około trzy rzędy wielkości mniejsza od wartości prądu przewodzenia.

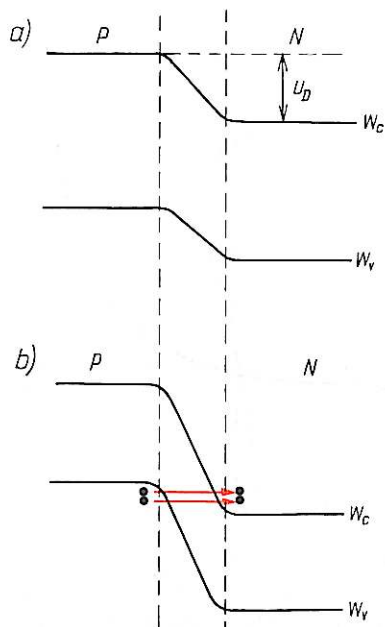
6.4. Przebicie złącza

Przebicie oznacza zniszczenie lub trwale uszkodzenie złącza pod wpływem gwałtownego wzrostu prądu, przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym.

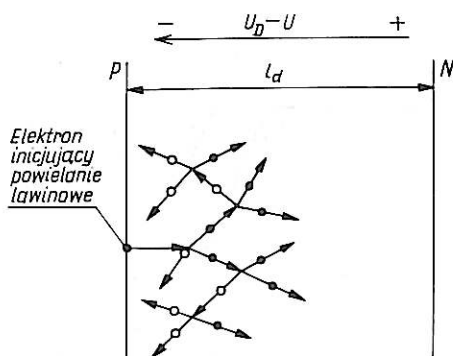
Napięcie, przy którym zachodzi przebicie złącza, nazywamy napięciem przebicia. Przebicie to może nastąpić w wyniku zjawiska Zenera lub powielania lawinowego.

Zjawisko Zenera występuje w złączach o wąskiej warstwie zaporowej lub silnie domieszkowanych. Istota tego zjawiska jest przedstawiona na rys. 6.5. W modelu pasmowym złącza spolaryzowanego zaporowo, dno pasma podstawowego półprzewodnika typu P znajduje się powyżej poziomu energetycznego pasma przewodnictwa półprzewodnika typu N. Jeżeli elektron zostanie uwolniony z wiązania kowalencyjnego w półprzewodniku typu P, to może on przejść poprzez barierę energetyczną do półprzewodnika typu N, nie mając energii większej od energii tej bariery. Takie przejście elektronu nazywamy tunelowym. W wyniku tego zjawiska gwałtownie zwiększa się prąd wsteczny złącza. Zjawisko Zenera w złączach krzemowych występuje przy napięciach mniejszych niż 5 V.

Jeżeli złącze spolaryzujemy napięciem większym niż 7 V, to mamy wówczas do czynienia ze zjawiskiem powielania lawinowego (lawinowa jonizacja zderzeniowa). Jonizacja zderzeniowa może wystąpić tylko w tych złączach, których szerokość warstwy zaporowej jest dużo większa od drogi swobodnej nośnika. Istotę tego zjawiska przedstawiono na rys. 6.6. Powielanie lawinowe następuje w obszarze warstwy zaporowej. Swobodny nośnik, który znajdzie się w tej warstwie, jest rozpędzany w silnym polu elektrycznym, zderza się z innym elektronem w sieci krystalicznej i wybija go. W wyniku takiego zderzenia powstaje para elektron-dziura, która jest natychmiast rozdzielana w silnym polu elektrycznym, tworząc dodatkowo dwa swobodne nośniki. Poruszając się w polu, nabierają one wystarczającej energii do kolejnej jonizacji. W taki sposób dochodzi do powielania lawinowego. Ilościowo zjawisko to jest opisywane przez **współczynnik powielania lawinowego** — M , określany jako stosunek liczby nośników opuszczających warstwę zaporową do liczby nośników wchodzących do niej. Wartość napięcia przebicia lawinowego zależy od stopnia domieszkowania: im jest większy poziom domieszkowania, tym jest mniejsza wartość napięcia przebicia. Zjawiska: Zenera i lawinowe w swej istocie nie niszczą trwale złącza, ale długotrwały przepływ prądu o dużej wartości prowadzi do wydzielania się dużej ilości ciepła, które powoduje trwałe uszkodzenie złącza.



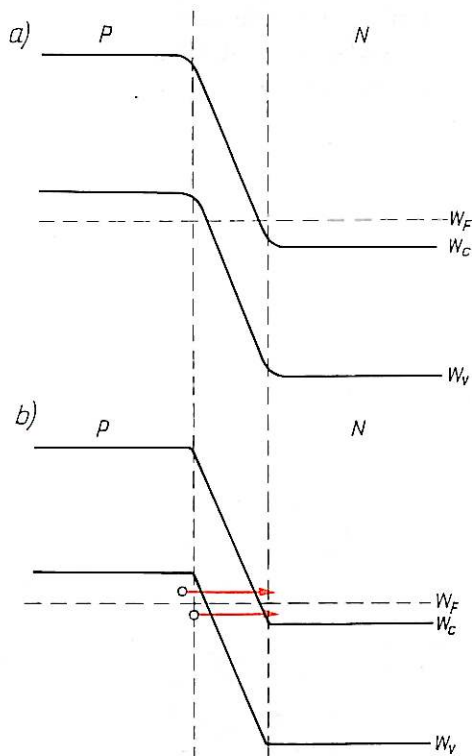
Rys. 6.5. Zjawisko Zenera: a) złącze przed spolaryzowaniem; b) złącze po spolaryzowaniu [6]



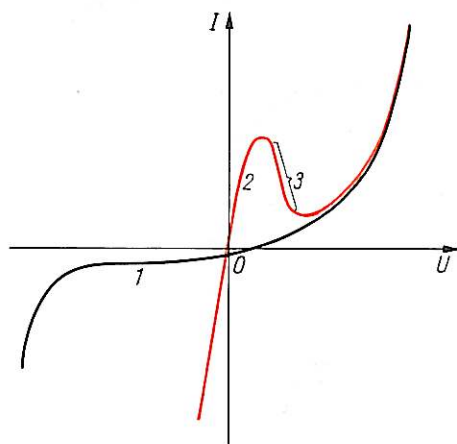
Rys. 6.6. Powielanie lawinowe [6]

6.5. Zjawisko tunelowe

Zjawisko tunelowe występuje w złączach bardzo silnie domieszkowanych, przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia (rys. 6.7). W modelu pasmowym, dno pasma podstawowego półprzewodnika typu P jest powyżej wierzchołka pasma przewodnictwa półprzewodnika typu N. To umożliwia przejście tunelowe nośników z jednego półprzewodnika (P) do drugiego (N), a utrudnia przejście w przeciwną stronę nawet przy bardzo małym napięciu polaryzacji. Początkowo, wzrost napięcia polaryzującego złącze w kierunku przewodzenia powoduje wzrost prądu w złączu (odcinek 2). Przy dalszym zwiększaniu napięcia przewodzenia, prąd tunelowy maleje do zera, ponieważ podnosi się poziom W_C w półprzewodniku typu N — maleje napięcie na warstwie zaporowej. Coraz mniej nośników może przepływać z obszaru P do N pod wpływem zjawiska tunelowego. W związku z tym zjawiskiem, na charakterystyce prądowo-napięciowej powstaje odcinek o ujemnej rezystancji dynamicznej (rys. 6.8, odcinek 3).



Rys. 6.7. Zjawisko tunelowe: a) złącze przed spolaryzowaniem; b) złącze po spolaryzowaniu



Rys. 6.8. Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza PN ze zjawiskiem tunelowym [1]

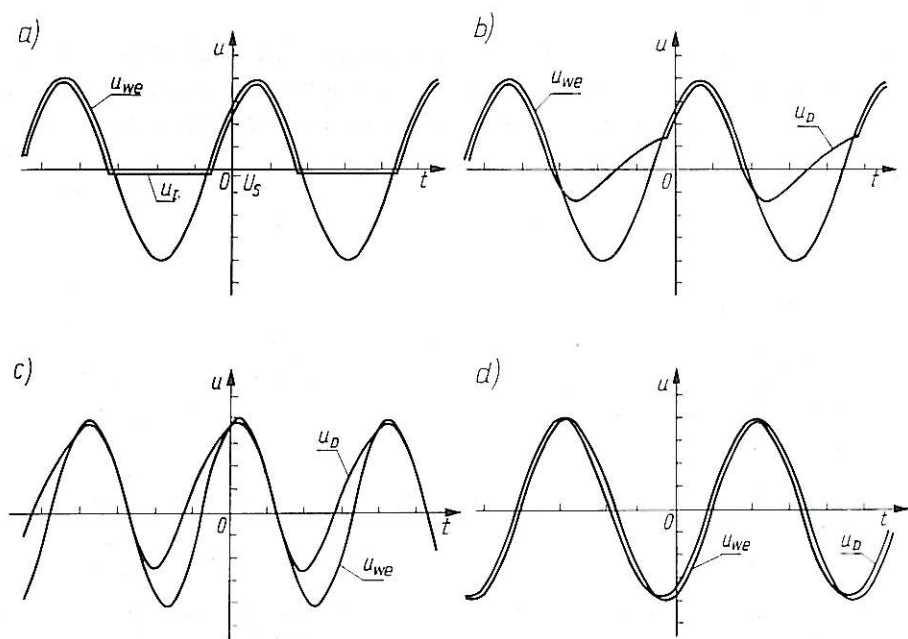
1 — charakterystyka prądowo-napięciowa złącza PN, 2 — prąd tunelowy, 3 — odcinek charakterystyki o ujemnej rezystancji

6.6. Schemat zastępczy i parametry złącza PN

6.6.1. Pojemności złącza

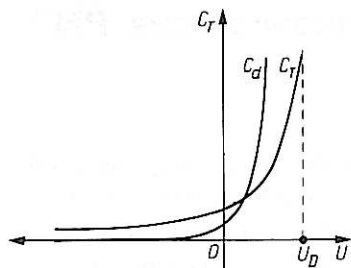
Schemat zastępczy złącza uwzględnia zjawiska w obszarach przyłączeniowych i warstwie zaporowej, zachodzące w wyniku zmian wartości napięcia przyłożonego do złącza. Zjawiska te decydują o szybkości działania złącza.

Gwałtowna zmiana napięcia przykładanego do złącza powoduje zwężenie bądź rozszerzenie warstwy zaporowej, a co za tym idzie, zmianę liczby magazynowanych par elektron-dziura. W schemacie zastępczym jest to reprezentowane przez **pojemność dyfuzyjną** — C_d . Rozważmy teraz, co będzie się działo, gdy zwiększy się częstotliwość zmieniającego się napięcia. Przy małych częstotliwościach (okres przebiegu dużo dłuższy od czasu życia nośników mniejszościowych), magazynowane pary elektron-dziura są doprowadzane lub dostarczane wraz ze zmianami napięcia (rys. 6.9). Jeżeli zwiększy się częstotliwość sygnału (okres przebiegu porównywalny z czasem życia nośników), to przy polaryzacji wstecznej nie wszystkie pary elektron-dziura nadążają za zmianami napięcia, a więc przez złącze w kierunku zaporowym popłynie prąd większy od prądu nasycenia złącza I_s (rys. 6.9b, c, d). Z powyższych rozważań wynika, że pojemność C_d wprowadza duże ograniczenia w szybkim przełączaniu złącza.



Rys. 6.9. Wpływ zmian częstotliwości napięcia przykładanego do złącza na jego pracę: a) napięcie przykładane do złącza; b), c) wpływ pojemności C_d ze wzrostem częstotliwości napięcia; d) złącze zachowuje się jak kondensator

U_S — spadek napięcia na złączu związany z przepływem prądu I_s



Rys. 6.10. Zależność pojemności dyfuzyjnej C_d i pojemności warstwy zaporowej C_T od napięcia polaryzacji złącza PN [1]

Zastanówmy się, co dzieje się w warstwie zaporowej w wyniku zmieniającego się napięcia. Jak wiemy, w warstwie tej znajdują się swobodne nośniki, które w schemacie zastępczym reprezentuje **pojemność warstwy zaporowej** — C_T . Wraz ze zmianami napięcia zmienia się szerokość warstwy zaporowej i natężenie pola w złączu. Zwiększa się ilość swobodnych nośników, a więc zmienia się pojemność warstwy zaporowej. Zmiany obu pojemności w zależności od napięcia polaryzacji ukazano na rys. 6.10.

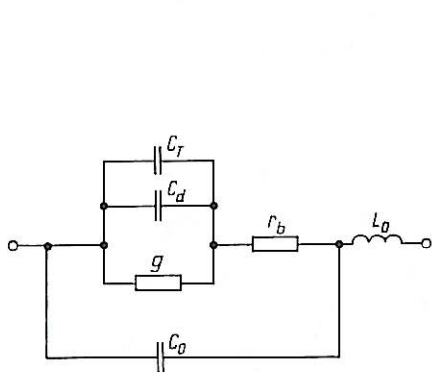
6.6.2. Konduktancja i rezystancja złącza

Zastanówmy się, czy złącze PN przedstawia sobą jakąś rezystancję. Materiał półprzewodnikowy ma pewną rezystywność (patrz rozdz. 4.5), a więc obszary półprzewodnika typu P i N mają pewne rezystancje, których wartość

$$r = \rho w / S,$$

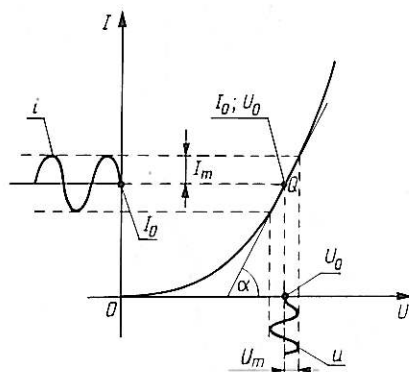
przy czym: ρ — rezystywność obszaru półprzewodnika, w — długość tego obszaru, S — powierzchnia półprzewodnika.

W schemacie zastępczym (rys. 6.11) uwzględniamy tylko rezystancję obszaru słabiej domieszkowanego i oznaczamy ją symbolem r_b . Znajdujący się na schemacie symbol g określa tzw. **konduktancję różniczkową złącza**, która



Rys. 6.11. Schemat zastępczy złącza p - n stanowiącego diodę [1]

C_T — pojemność warstwy zaporowej, C_d — pojemność dyfuzyjna, g — konduktancja złącza, r_b — rezystancja obszaru słabiej domieszkowanego, L_0 — indukcyjność doprowadzeń, C_0 — pojemność oprawki



Rys. 6.12. Sposób wyznaczania konduktancji złącza PN [1]

Q — punkt pracy, I_0 , U_0 — prąd i napięcie w punkcie pracy, I_m , U_m — amplituda prądu i napięcia

ilustruje zmiany prądu w funkcji napięcia. Wartość ta jest określana dla składowej zmiennej napięcia wejściowego o małej amplitudzie ($U_m < kT/q = 26 \text{ mV}$) — rys. 6.12.

Przy takiej wartości amplitudy, można uznać, że zmieniający się punkt pracy Q złącza porusza się po linii prostej o nachyleniu α . Zatem, konduktancję złącza można określić wzorem

$$g = \operatorname{tg} \alpha = \left. \frac{dI}{dU} \right|_{I=I_0} \approx \frac{q}{kT} I_0,$$

w którym I_0 jest prądem płynącym przez złącze w punkcie pracy Q .

6.7. Przełączanie złącza PN (diody)

Na podstawie pełnego schematu zastępczego diody (uwzględniającego pojemności), będącego rozszerzeniem schematu liniowego, można przeanalizować przełączanie złącza PN stanowiącego diodę (rys. 6.13).

Proces przełączania diody zachodzi przy zmianie napięcia generatora z wartości $-E_R$ na $+E_F$ i odwrotnie. Omawiane zjawiska są zauważalne przy bardzo szybkim narastaniu i opadaniu przebiegu napięcia wejściowego (np. napięcia prostokątnego o częstotliwości $f = 50 \text{ MHz}$). Jeżeli $e_g = -E_R$, to dioda jest spolaryzowana w kierunku zaporowym i prąd przez nią nie płynie ($i = 0$, $u = -E_R$). W momencie zmiany napięcia na generatorze (czas t_1), dioda zmienia polaryzację. Prąd płynący przez diodę rośnie skokowo do wartości $i = I_M = (E_F + E_R)/R$, a potem maleje wykładniczo do wartości $I_F = (E_F - U_F)/R$, ładując pojemność złączową C diody (czas t_2). W tym czasie napięcie na diodzie rośnie wykładniczo do wartości U_F . Różnica między czasem t_2 i t_1 jest określana jako **czas włączania diody**

$$t_d = RC \ln[(E_F + E_R)/(E_F - U_F)].$$

Cykl wyłączania diody rozpoczyna się w chwili t_3 . Przez diodę płynie prąd $I_R = (E_R + U_F)/R$ do czasu, kiedy napięcie na diodzie nie osiągnie wartości równej zero (czas t_4) — co odpowiada usuwaniu ładunków nadmiarowych. Następnie wartość prądu diody maleje do zera, a napięcie dąży do wartości $-E_R$ (czas t_5); kończy się cykl wyłączania diody.

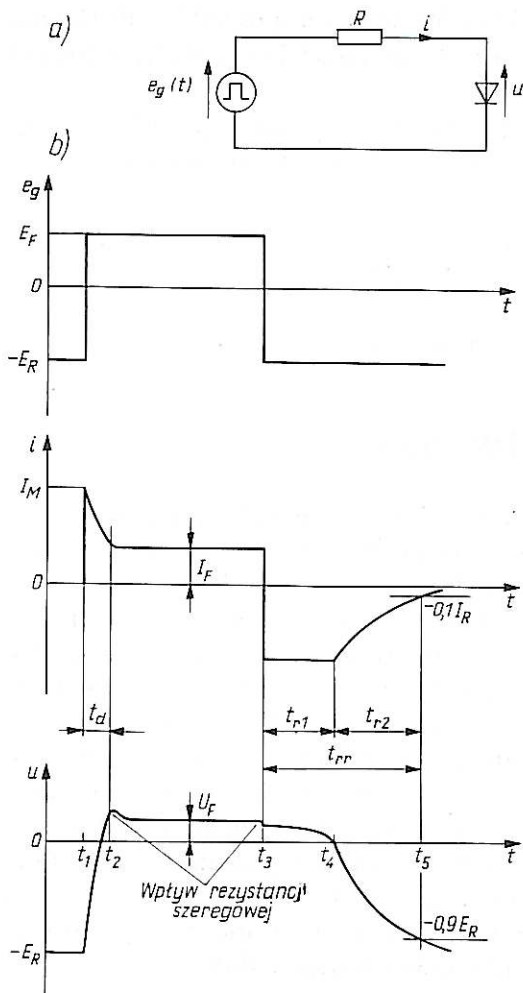
Czas wyłączania diody

$$t_r = t_5 - t_3 = t_{r1} + t_{r2},$$

przy czym: $t_{r1} = t_i \ln(1 + I_F/I_R)$, $t_{r2} = 2,3RC$, t_i — czas przelotu nośników przez złącze.

Przykład

Dioda ma następujące parametry: $t_i = 2,5 \text{ ns}$, $C = 3 \text{ pF}$, $U_F = 0,7 \text{ V}$, $E_F = 4 \text{ V}$, $E_R = 2 \text{ V}$, a rezystancja w obwodzie $R = 12 \text{ k}\Omega$. Czas włączania tej diody będzie wynosił $21,5 \text{ ns}$, a czas wyłączania — 85 ns .



Rys. 6.13. Przełączanie diody:
a) schemat obwodu; b) przebiegi czasowe [9]

e_g — napięcie z generatora przełączającego diodę, i , u — przebiegi prądu i napięcia na diodzie w czasie przełączania, t_d — czas włączenia diody, t_{rr} — czas wyłączenia diody

Pytania kontrolne:

1. Co to jest złącze? Jakie znasz rodzaje złączy?
2. Jaki jest związek warstwy zaporowej z ładunkiem przestrzennym?
3. Czym różni się polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia od polaryzacji w kierunku zaporowym?
4. Od czego zależy wartość prądu płynącego przez złącze?
5. Czym różni się prąd przewodzenia od prądu nasycenia?
6. Jakie zjawiska są związane z przebiciem złącza?
7. Jakie są różnice między zjawiskiem Zenera, tunelowym i lawinowym?
8. Od czego zależą parametry złącza? Czym różni się pojemność złączowa od dyfuzyjnej?
9. Wyjaśnij na czym polega proces przełączania złącza.

10. Oblicz wartość napięcia dyfuzyjnego złącza skokowego wykonanego z krzemu lub germanu, jeżeli koncentracja domieszek wynosi:

- a) $N_A = 2 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $N_D = 10^{22} \text{ m}^{-3}$;
- b) $N_A = 10^{21} \text{ m}^{-3}$, $N_D = 5 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$;
- c) $N_A = N_D = 10^{22} \text{ m}^{-3}$;
- d) $N_A = 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $N_D = 10^{21} \text{ m}^{-3}$.

Zastosuj wzór $U_D = U_T \ln(N_A N_D / n_i^2)$.

11. Oblicz szerokość warstwy zaporowej dla danych z zadania poprzedniego, wiedząc że $l_d = \sqrt{2\epsilon_r \epsilon_0 (N_D + N_A) (U_D - U) / q N_D N_A}$.

12. Oblicz wartość prądu nasycenia złącza dla danych z zadania poprzedniego i zadania 12 z rozdz. 4.

13. Oblicz natężenie prądu płynącego przez złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia i zaporowym, przyjmując dane z zadania poprzedniego i wartości napięć:

- a) 1 V; b) 10 V; c) 100 V.

14. Oblicz czasy przełączania diody przy $R = 15 \text{ k}\Omega$, gdy:

- | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| a) $t_i = 2 \text{ ns}$, | $U_F = 0.6 \text{ V}$, | $E_F = 4 \text{ V}$, | $E_R = 2 \text{ V}$; |
| b) $t_i = 1 \text{ ns}$, | $U_F = 0.65 \text{ V}$, | $E_F = 4 \text{ V}$, | $E_R = 2 \text{ V}$; |
| c) $t_i = 0.5 \text{ ns}$, | $U_F = 0.5 \text{ V}$, | $E_F = 4 \text{ V}$, | $E_R = 2 \text{ V}$. |

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Elektrotechnika:

- Transmisję sygnału przez elementy nieliniowe.

Elektronika:

- Schemat zastępczy złącza i jego charakterystykę prądowo-napięciową (rozdz. 6.3).
- Na czym polega zjawisko Zenera, lawinowe i tunelowe (rozdz. 6.4, 6.5).
- Parametry złącza (rozdz. 6.6).

7. Diody półprzewodnikowe

Diodą półprzewodnikową nazywamy element wykonany z półprzewodnika, zawierającego jedno złącze — najczęściej PN z dwiema końcówkami wyprowadzeń, anodą *A* i katodą *K*. Charakterystyka diody oraz jej parametry są podobne, a nawet niekiedy takie same jak złącza PN. Diody są stosowane w układach analogowych i cyfrowych. W układach analogowych wykorzystywana jest zależność rezystancji dynamicznej od napięcia lub prądu wejściowego (między innymi powstają częstotliwości harmoniczne), lub też zmiany pojemności w funkcji napięcia. W układach cyfrowych istotne są natomiast właściwości przełączające diody.

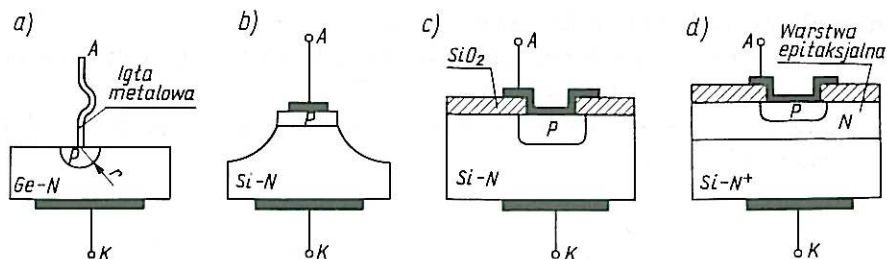
Diody półprzewodnikowe stosuje się w układach prostowania prądu zmiennego, w układach modulacji i detekcji, przełączania, generacji i wzmacniania sygnałów elektrycznych.

Ponieważ — jak już wspomniano — parametry diody są podobne do parametrów złącza PN, to i jej schemat zastępczy jest taki sam (patrz rozdz. 6.6.2), z tym że należy dodatkowo uwzględniać elementy pasożytnicze (opisujące niezamierzone efekty), tj.: indukcyjność doprowadzeń — L_0 i pojemność oprawki — C_0 (patrz rys. 6.11). Elementy te odgrywają istotną rolę przy zastosowaniu diody w zakresie częstotliwości wielkich i mikrofalowych.

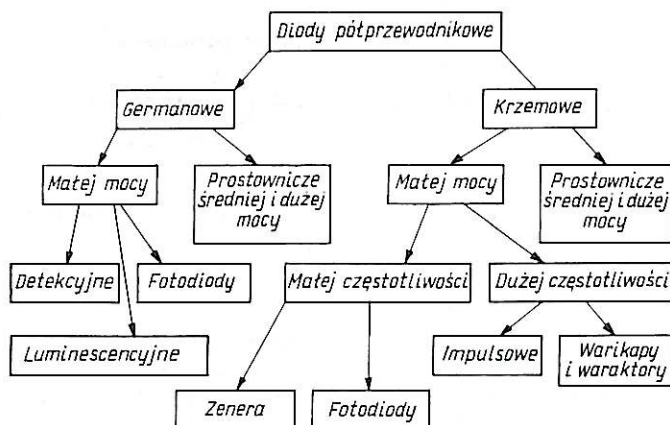
Każda dioda ma pewną częstotliwość graniczną, po przekroczeniu której nie zachowuje się jak dioda, lecz jak kondensator.

Klasyfikację diod przeprowadzamy ze względu na:

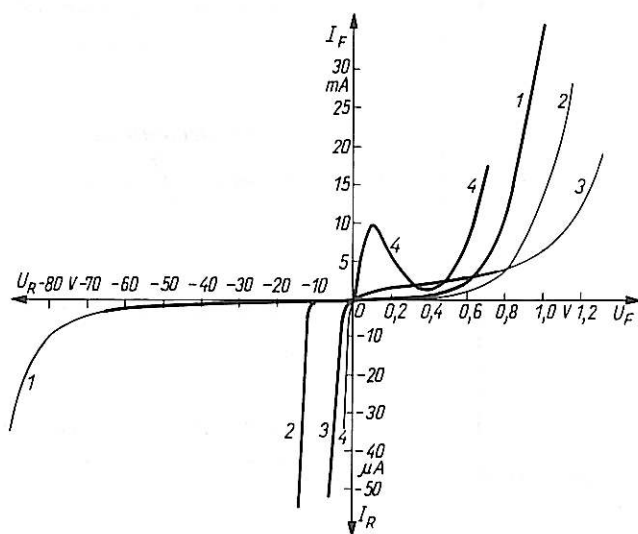
- materiał (**krzemowe, germanowe z arsenku galu**);
- konstrukcję (**ostrzowe i warstwowe; stopowe i dyfuzyjne: mesa, planarne i epiplanarne**) — rys. 7.1;
- strukturę fizyczną złącza (PN, MS, *heterozłącza*);
- zastosowanie (**prostownicze, uniwersalne, impulsowe, stabilizatory — Zenera, pojemnościowe — warikapki i waraktory, tunelowe, mikrofalowe: detekcyjne i mieszące oraz PIN**) — rys. 7.2;
- przebiegające zjawiska (**Zenera, Gunna, lawinowe, tunelowe**).



Rys. 7.1. Sposoby wytwarzania diod: a) ostrzowa; b) mesa; c) planarna; d) epiplanarna [6]



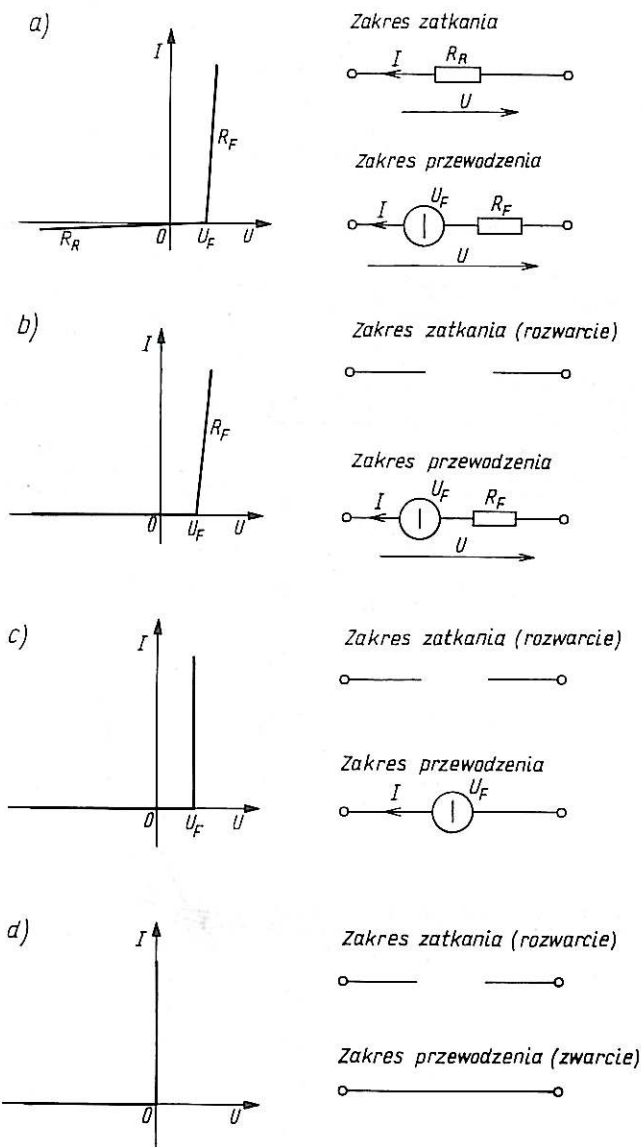
Rys. 7.2. Podział diod ze względu na zastosowanie [7]



Rys. 7.3. Charakterystyki prądowo-napięciowe diod
1 — prostowniczej (krzemowej), 2 — Zenera (stabilizatoru), 3 — zwrotnej (detekcyjnej, mieszającej), 4 — tunelowej; linią grubą zaznaczono typowy obszar pracy każdej diody. Cyfry 1, 2, 3, 4 oznaczają zwiększoną koncentrację domieszek

Różnorodność tych typów jest związana z:

- poziomem i rozkładem koncentracji domieszek, mających wpływ na charakterystykę prądowo-napięciową — rys. 7.3;
- rozmiarami geometrycznymi poszczególnych obszarów półprzewodnika i rodzajem obudowy.



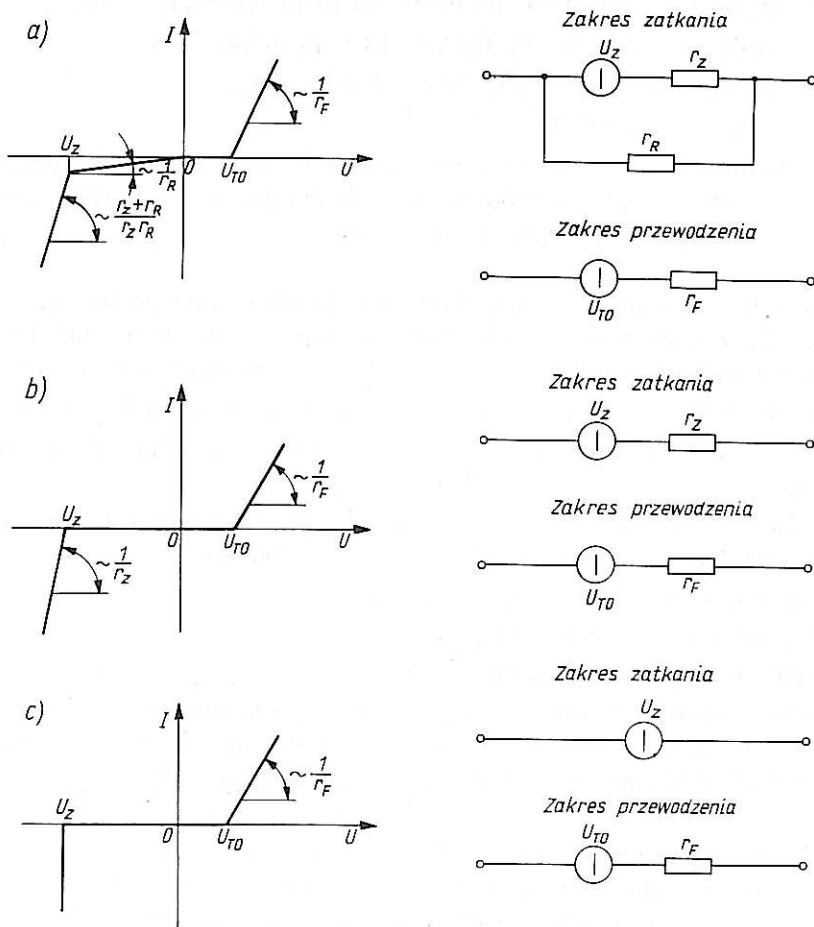
Rys. 7.4. Odcinkowo-liniowa aproksymacja charakterystyki statycznej diody prostowniczej i odpowiadający jej liniowy schemat zastępczy: a) uwzględniający rezystancję diody w kierunku zaporowym, — R_R i w kierunku przewodzenia R_F oraz to, że dioda jest źródłem napięcia U_F ; b) $R_R = \infty$; c) $R_R = \infty$, $R_F = 0$; d) $R_R = \infty$, $R_F = 0$, $U_F = 0$ [9]

Parametry techniczne diod mogą być charakterystyczne lub dopuszczalne (graniczne).

Wartość prądu nasycenia diod germanowych jest rzędu μA , a diod krzemowych — nA . Ze wzrostem temperatury prąd nasycenia podwaja swoją wartość (dla diody krzemowej co 6°C , a dla germanowej co 10°C).

Dla każdego typu diody możemy utworzyć liniowy schemat zastępczy, korzystając z odcinkowo-liniowej aproksymacji charakterystyki prądowo-napięciowej — co pokazano na przykładzie diody prostowniczej (rys. 7.4) i diody Zenera (rys. 7.5).

Oznaczenia diod, stosowane w tym rozdziale, dotyczą diod produkcji krajowej.



Rys. 7.5. Odcinkowo-liniowa aproksymacja charakterystyki statycznej diody stabilizacyjnej i odpowiadający jej liniowy schemat zastępczy: a) uwzględniający rezystancję diody w kierunku zaporowym — r_R , r_z , napięcie Zenera U_Z i w kierunku przewodzenia r_F oraz U_{T0} ; b) $r_R = \infty$, r_z , U_Z i r_F oraz U_{T0} ; c) $r_R = \infty$, $r_z = 0$, U_Z i r_F oraz U_{T0} [9]

7.1. Diody prostownicze

Diody prostownicze są przeznaczone do prostowania napięcia bądź prądu przemiennego o małej częstotliwości. Prostowanie jest to przetwarzanie prądu przemiennego na prąd jednokierunkowy.

Diody zaczynają przewodzić (następuje gwałtowny wzrost prądu) dopiero po przekroczeniu pewnej wartości napięcia w kierunku przewodzenia. Dla diod krzemowych wynosi ona ok. 0,7 V, a dla germanowych ok. 0,3 V. Są one głównie stosowane w układach prostowniczych bloków zasilania jak również w powielaczach wysokiego napięcia.

Diody prostownicze mają następujące oznaczenia:

- diody wysokiego napięcia — BAYP50, BYP350;
- diody typowe — BAYP80, BYP680, BYBP10, BYP401, Y401;
- diody mocy — D00-100-10, D3A2-10-12, D20-300-10;
- diody szybkie mocy — DR12-10-01, DR51-80-12;
- stos diodowy — Y350-3K.

Diody prostownicze mają małą rezystancję w kierunku przewodzenia — rzędu pojedynczych Ω (nie podaje się w katalogach), co pozwala na uzyskanie dużych sprawności prostowania.

Parametrami charakteryzującymi diody prostownicze (nie podaje się ich dla diod szybkich mocy oraz dla niektórych diod mocy — np. D51, D61, D66) są:

- **napięcie przewodzenia** — U_F , przy określonym prądzie przewodzenia;
- **prąd wsteczny** — I_R , przy określonym napięciu w kierunku zaporowym;
- **czas ustalania się prądu wstecznego** — t (podaje się tylko dla niektórych diod);
- **pojemność** — C , przy określonym napięciu przewodzenia (np. dla typowej diody BYP680 — $C = 15 \text{ pF}$ przy $U_F = 100 \text{ V}$).

Parametrami granicznymi (dopuszczalne) są:

- **maksymalny prąd przewodzenia** — I_0 ;
- **szczytowe napięcie wsteczne** — U_{RWM} ;
- **parametr przeciążeniowy** — I^2t , podawany dla diod mocy.

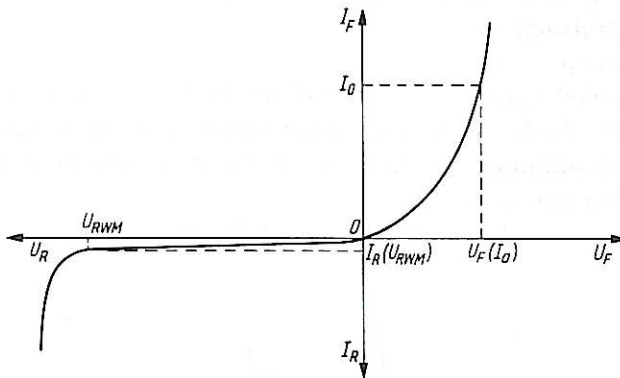
Powyższe parametry zebrano w tab. 7.1, a na charakterystyce prądowo-napięciowej diody prostowniczej (rys. 7.6) zaznaczono tylko najważniejsze z nich.

Diody prostownicze wykonuje się głównie z *krzemu*. Wartość prądu płynącego przez diodę spolaryzowaną w kierunku przewodzenia jest $10^6 \div 10^8$ razy większa od wartości prądu w kierunku zaporowym. Diody prostownicze, ze względu na wydzielaną w nich moc, dzielimy na:

- **małej mocy** — poniżej 1 W,
- **średniej mocy** — od 1 do 10 W,
- **dużej mocy** — powyżej 10 W.

Parametry diod prostowniczych

Parametr		Rodzaj diody				
		typowa	mocy	szybka mocy	wysokiego napięcia	stos diodowy
U_F	[V]	$1 \div 1,3$	$1,2 \div 2,15$	—	$20 \div 50$	40
I_R	[A]	$1 \div 50 \mu$	$3,5 \text{ m} \div 10,1$	—	10μ	10μ
t	[s]	500 n	$1 \div 20 \mu$	—	$0,4 \div 0,5 \mu$	—
I_0	[A]	$0,4 \div 5$	$10 \div 1600$	$10 \div 400$	8 m	5 m
U_{RWM}	[V]	$25 \div 100$	$25 \div 3200$	$100 \div 1400$	$1,8 \text{ k} \div 10 \text{ k}$	3 k lub 5 k
$\hat{F}t$	[A ² s]	—	$180 \div 1,05 \text{ M}$	$112 \div 100 \text{ k}$	—	—



Rys. 7.6. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody prostowniczej [6]

U_{RWM} — maksymalne napięcie wsteczne, U_F — napięcie przewodzenia, I_0 — maksymalny prąd przewodzenia

Są również produkowane diody prostownicze o mocy do kilku kilowatów. Diody, przez które płynie prąd o wartości większej niż 10 A mają radiator, który odprowadza wydzielane ciepło do otoczenia. Czasami jest to niewystarczające i dioda musi być chłodzona wymuszonym opływem powietrza, a nawet specjalną cieczą. Jeżeli chcemy uzyskać większy prąd przewodzenia przy tym samym napięciu, to możemy połączyć kilka diod równolegle. Jeśli dodatkowo chcemy mieć jednakowe prądy płynące przez poszczególne diody, to do każdej z nich dołączamy szeregowo rezystor o niewielkiej wartości. Natomiast jeśli chcemy zwiększyć napięcie wsteczne przy tym samym prądzie, to w miejsce jednej diody wstawiamy kilka diod połączonych szeregowo.

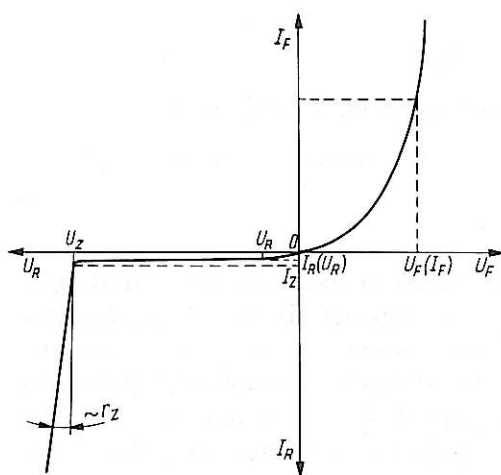
7.2. Diody stabilizacyjne

Są to diody przeznaczone do stabilizacji lub ograniczania napięć. Istnieją diody stabilizujące prąd i są nazywane polowymi ogranicznikami prądu (działają na innej zasadzie). Diody stabilizacyjne **pracują przy polaryzacji w kierunku zaporowym, charakteryzując się niewielkimi zmianami napięcia pod wpływem dużych zmian prądu**. Wykorzystują one zjawisko Zenera bądź (i) lawinowe (patrz rozdz. 6.4). Diody stabilizujące mają podobne oznaczenia jak diody prostownicze. Poniżej podano oznaczenia diod w zależności od ich przeznaczenia:

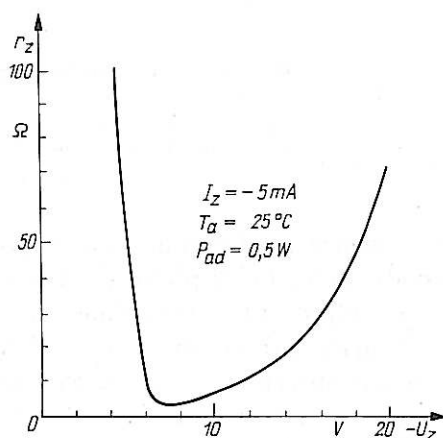
- stabilizacyjne — BZP650;
- Zenera:
 - typowe (stabilistor) — BZAP30, BZP650;
 - do układów hybrydowych — BZX84;
 - skompensowana temperaturowo — BZY566;
 - do układów elektronicznego zapłonu — BZYP01.

Na charakterystyce prądowo-napięciowej (rys. 7.7) zaznaczono parametry charakterystyczne diod stabilizacyjnych. Są to:

- **napięcie stabilizacji** — U_Z ;
- **prąd stabilizacji** — I_Z ;
- napięcie przewodzenia — U_F , przy określonym prądzie przewodzenia;
- prąd wsteczny diody — I_R , przy określonym napięciu wstecznym;
- **rezystancja dynamiczna** — r_Z , której wartość zmienia się w zależności od napięcia stabilizacji (rys. 7.8);
- temperaturowy współczynnik napięcia stabilizacji — α_{U_Z} .



Rys. 7.7. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody stabilizacyjnej [6]
 U_Z — napięcie stabilizacji, U_F — napięcie przewodzenia,
 I_R — prąd wsteczny, r_Z — rezystancja dynamiczna



Rys. 7.8. Zależność rezystancji dynamicznej diody od napięcia stabilizowanego [15]

Do parametrów dopuszczalnych zaliczamy: maksymalną moc strat — P_{tot} i maksymalny prąd przewodzenia — I_0 . Wartości parametrów różnych diod zebrano w tab. 7.2.

Tabela 7.2

Parametry diod stabilizacyjnych

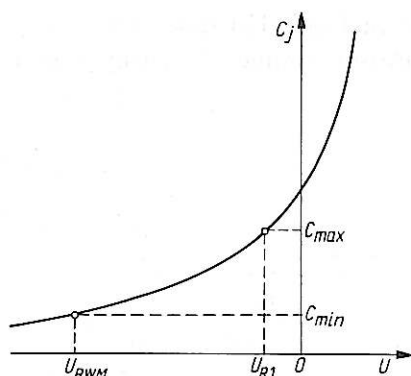
Rodzaj diody		Parametr						
		U_Z	U_F	I_R	r_Z	α_{U_Z}	P_{tot}	I_0
		V	V	A	Ω	$10^{-1}/^{\circ}\text{C}$	W	A
Z	typowa	3,1 do 36,5	1,1 do 1,2	0,5 do 20μ	2 do 100	-6 do -2,5 lub +2 do +11	0,25 do 1,2	0,2 lub 3
E N	do układów hybrydowych	4,4 do 12,7	0,9	100 n do 3μ	10 do 80	0,5 do 8,8	0,2	0,2
E R	skompensowana temperaturowo	6,08 do 6,72	—	—	25 do 200	0,05 do 0,5	0,25	—
A	do układów elektronicznego zapłonu	138 do 244	1,5	1μ	300 do 400	+11	1,3	0,2
Stabilizacyjna		—	0,66 do 0,85	1μ	2 do 8	-40 lub -30	—	—

7.3. Diody pojemnościowe

Diody pojemnościowe (warikapy i waraktory) pracują przy polaryzacji zaporowej, charakteryzując się zmienną pojemnością w funkcji przyłożonego napięcia.

Warikapy stosuje się do przestrajania obwodów rezonansowych, waraktory natomiast — w układach parametrycznych (układ parametryczny to taki, w którym co najmniej jeden parametr zmienia się w czasie), we wzmacniaczach lub powielaczach częstotliwości oraz układach mikrofalowych. Diody pojemnościowe stosuje się również w układach modulacji częstotliwości i przełącznikach sygnałów mikrofalowych. Ze względu na małe wymiary diod pojemnościowych, dużą wytrzymałość na udary i małą zależność od zmian temperatury, mogą one w wielu wypadkach zastąpić kondensatory zmienne lub ceramiczne.

Diody pojemnościowe mają następujące oznaczenia: warikap — B104, BB104, BBAP05A, waraktor — BXDP14, BXDP74B.



Rys. 7.9. Charakterystyka pojemnościowo-napięciowa diody pojemnościowej [6]

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

Parametrami charakterystycznymi diod pojemnościowych są:

- **prąd wsteczny** — I_R , przy określonym napięciu zaporowym;
- **pojemność złącza** — C_j , przy określonym napięciu wstecznym (typową charakterystyką diody pojemnościowej jest zależność pojemności od przyłożonego napięcia);
- **stosunek pojemności minimalnej** — C_{min} **do maksymalnej** — C_{max} (rys. 7.9), przy dwóch różnych napięciach wstecznych (bliskim zeru i wartości maksymalnej);
- **rezystancja szeregową** — r_s , przy określonym napięciu wstecznym, lub **dobroć** — Q_c (podaje się dla warikapów);
- **maksymalna częstotliwość** — f_c (podaje się dla waraktorów).

Do parametrów granicznych należą:

- **maksymalne napięcie wsteczne** — U_{RWM} ;
- **maksymalny prąd przewodzenia** — I_0 (dla warikapów);
- **maksymalna moc** — P_{tot} (dla waraktorów).

Wartości parametrów są zebrane w tab. 7.3.

Tabela 7.3

Parametry diod pojemnościowych

Parametr		Warikap	Waraktor
I_R	[A]	50 lub 200 n	10 μ
C	[pF]	1,6 do 4,5	0,5 do 10
r	[Ω]	0,4 do 16	—
f_c	[Hz]	—	15 do 150 G
U_{RWM}	[V]	28 lub 30	6 do 90
I_0	[A]	0,02 do 0,1	—
P_{tot}	[W]	—	0,3 do 4

7.4. Diody przełączające

Do diod przełączających (impulsowych) zaliczamy diody: **tunelowe**, **ładunkowe**, **ostrzowe**, **Schottky'ego**.

Diody impulsowe wykorzystuje się w układach cyfrowych do przełączania sygnałów; w układach impulsowych diody pracują jako selektory impulsów. Diody ładunkowe i ostrzowe umożliwiają formowanie impulsów prostokątnych o bardzo krótkim czasie narastania i opadania. Najmniejsze czasy przełączania (poniżej 0,1 ns) uzyskuje się dla diod Schottky'ego.

Przykładowe oznaczenia diod przełączających:

- typowa — A182, BA152P, BAYP95A, Y155-25;
- do układów hybrydowych — BABE95, BAR99, BAW56;
- do matryc pamięci ferrytowych — BAS810.

Parametrami (tab. 7.4) charakterystycznymi diod przełączających są:

- **pojemność diody** — C ,
- **napięcie przewodzenia** — U_F ,
- **prąd wsteczny** — I_R ,
- **czas ustalania się prądu wstecznego** — t_{rr} .

Tabela 7.4

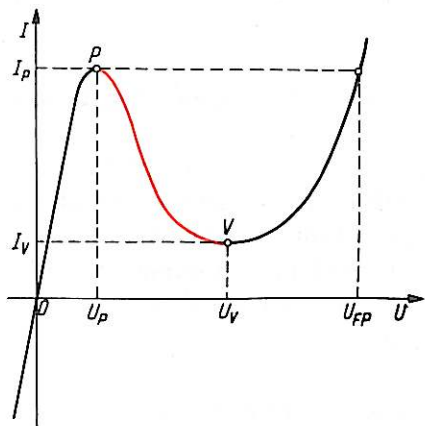
Parametry diod przełączających

Parametr		Rodzaj diody		
		typowe	do układów hybrydowych	do matryc ferrytowych
U_F	V	1,62 ÷ 1,5	0,855 lub 1	1 ÷ 1,15
I_R	A	25 n ÷ 100 μ	100 n	10 n
C	pF	1,5 ÷ 5	2	8
t_{rr}	s	2 ÷ 500 n	2 n lub 6 n	—
U_{RWM}	V	10 ÷ 1000	50 lub 70	50

Parametrem granicznym diody przełączającej jest maksymalne napięcie wsteczne — U_{RWM} .

Diody tunelowe stosuje się m.in. w przełącznikach, we wzmacniaczach o małych szumach i w generatorach mikrofalowych, które wykorzystują ujemną rezystancję diody (rys. 7.10).

Działanie tych diod jest oparte na zjawisku tunelowym (patrz rozdz. 6.5). Przy bardzo małych wartościach napięć w kierunku przewodzenia (od ok. 50 mV do ok. 350 mV), prąd zaczyna wzrastać szybciej niż w zwykłej diodzie. Przy wzroście napięcia do punktu P (punkt szczytu), prąd zaczyna



Rys. 7.10. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody tunelowej [6]

U_P, U_{FP} — napięcia w kierunku przewodzenia odpowiadające prądowi szczytu (I_P), V — punkt doliny i odpowiadający jej prąd (I_V) i napięcie (U_V)

maleć aż osiągnie punkt V (punkt doliny). W tym zakresie dioda wykazuje rezystancję ujemną. Dalszy wzrost napięcia powoduje wzrost prądu; charakterystyka diody tunelowej pokrywa się z charakterystyką zwykłej diody. W zależności od tego, z jakiego materiału półprzewodnikowego jest wykonana dioda tunelowa, jej punkt szczytu i doliny przesuwają się w prawo na charakterystyce, tzn. zwiększa się wartość napięcia odpowiadającego punktowi doliny.

Parametrami charakterystycznymi diody tunelowej są:

- **napięcie i prąd punktu doliny** — U_V, I_V ;
- **napięcie i prąd punktu szczytu** — U_P, I_P ;
- stosunek prądu szczytu do prądu doliny (nie zawsze podawany);
- **rezystancja dynamiczna** — r_z (minimalna lub średnia);
- pojemność warstwy zaporowej — C_T .

Natomiast parametrem dopuszczalnym diody tunelowej jest maksymalny prąd w kierunku przewodzenia i w kierunku zaporowym.

7.5. Diody detekcyjne i mieszające

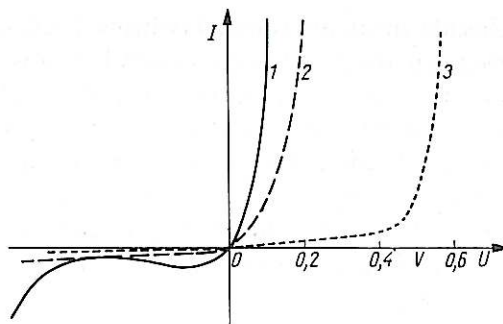
Diody te są wykonywane jako: ostrzowe krzemowe i germanowe, Schottky'ego, wsteczne. Na rysunku 7.11 przedstawiono ich charakterystyki prądowo-napięciowe. Diody te pracują przy częstotliwościach rzędu gigaherców.

Ich najważniejsze parametry to:

- **czułość prądowa** — h — stosunek prądu wstecznego do doprowadzonej mocy wejściowej ($h = I_0/P_{we}$ i osiąga wartości $1 \div 20$ A/W);
- **sprawność detekcji** — η (dla diod detekcyjnych) — stosunek mocy sygnału zdemodulowanego do mocy sygnału wejściowego (wynosi ok. 60%);

Rys. 7.11. Charakterystyki prądowo-napięciowe diod [6]

1 — diody zwrótnej, 2 — diody ostrzowej,
3 — diody Schottky'ego



- **straty przemiany**, które są wyrażone w dB — stosunek doprowadzonej mocy wejściowej do mocy wyjściowej odprowadzonej do obciążenia (wynoszą zwykle $5 \div 8$ dB);
 - **impedancja wyjściowa** (podawana dla diod mieszających).
- Jak widać nie zaliczają się do nich parametry graniczne.

Diody zwrótne jest znana pod nazwą diody wstecznej (ang. *backward diode*). Podobnie jak w diodzie tunelowej — płynie przez nią w kierunku wstecznym duży prąd związany ze zjawiskiem Zenera. Natomiast w kierunku przewodzenia — płynie przez nią niewielki prąd, który gwałtownie rośnie, gdy napięcie przekroczy wartość progową (bliskie zera).

Diody Schottky'ego (np. BAP280, MBR) ma złącze metal-półprzewodnik i charakteryzuje się tym, że przy zmianie jej polaryzacji z kierunku przewodzenia na zaporowy ma małą bezwładność — co daje najmniejsze czasy przełączania. Poza tym charakteryzuje się dużą stabilnością i niezawodnością, większym napięciem wstecznym niż diody ostrzowe oraz małym prądem wstecznym.

Diody ostrzowe pracują jako diody detekcyjne i mieszające przy częstotliwości 200 GHz, ze względu na ich małe pojemności złącza. Ostrzowe diody germanowe pracują w zakresie częstotliwości do kilkuset MHz. Używa się ich w urządzeniach pomiarowych oraz w odbiornikach radiowych i telewizyjnych do: detekcji, ograniczania amplitudy i separacji impulsów synchronizujących.

7.6. Diody generacyjne i wzmacniające

Do diod generacyjnych i wzmacniających zalicza się diody:

- tunelowe (omówione w rozdz. 7.4);
- lawinowe Reada i Impatt (stosowane we współpracy z rezonatorami mikrofalowymi);
- Gunna (np. CXDP).

Zasada działania **diody lawinowej** jest oparta na zjawisku przebicia lawinowego (patrz rozdz. 6.4). Dioda lawinowa, pracująca przy częstotliwości bliskiej $1/2 \tau$ (τ — czas życia nośników), wykazuje ujemną rezystancję dynamiczną; następuje przesunięcie w fazie napięcia względem prądu o 180° .

Dioda Gunna jest to element, którego działanie polega na specyficznej zależności prędkości elektronów od natężenia pola elektrycznego (zjawisko Gunna), czego rezultatem jest istnienie ujemnej konduktancji w diodzie. Diody Gunna są stosowane w generatorach mikrofalowych o częstotliwości rzędu GHz.

7.7. Diody modulacyjne i tłumiące

Dioda PIN (np. BADP23) jest zbudowana z trzech warstw półprzewodnika: typu P i typu N, przedzielonych warstwą półprzewodnika samoistnego. W zakresie bardzo wielkich częstotliwości dioda ta charakteryzuje się zmienną impedancją zależną od przyłożonego napięcia. Przy polaryzacji w kierunku zaporowym stanowi sobą dużą rezystancję i bardzo małą pojemność, natomiast przy polaryzacji w kierunku przewodzenia — małą impedancję. W związku z tym jest ona używana jako regulowany rezystor lub jako przełącznik. Można też za pomocą diody PIN modulować amplitudę sygnału wielkiej częstotliwości lub stosować ją w regulowanych układach tłumiących odbiorników telewizyjnych i radiowych w zakresie ukf (w tunerach).

Pytania kontrolne:

1. Czym różnią się diody małej i dużej mocy?
2. Porównaj działanie diody zwrotnej i diody Zenera.
3. Co to jest częstotliwość graniczna diody?
4. Jakie wartości mają prądy wsteczne płynące w różnych typach diod?
5. Podaj przykłady odcinkowo liniowej aproksymacji charakterystyki prądowo-napięciowej różnych typów diod.
6. Jakie parametry mają diody prostownicze, stabilizacyjne, przełączające?
7. Wymień podstawowe parametry i zastosowania diod pojemnościowych.
8. Omów budowę i zastosowanie diody PIN.
9. Jakiego typu diody pracują przy polaryzacji zaporowej, a jakiego typu przy polaryzacji w kierunku przewodzenia?
10. Która z opisanych diod ma najmniejszą wartość pojemności i gdzie jest stosowana?
11. Jakich diod używa się w układach formujących impulsy, a jakich przy częstotliwościach rzędu GHz?

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Matematyka:

- Wykres hiperboliczny.

Elektrotechnika:

- Pojęcie czwórnika.
- Schemat zastępczy układów do wyznaczania parametrów macierzy h .
- Przesunięcie fazowe wprowadzane przez kondensator.

Elektronika:

- Co to jest półprzewodnik typu N i typu P (rozdz. 4.3).
- Polaryzację złącza w kierunku przewodzenia i w kierunku zaporowym (rozdz. 6.3).
- Przelączenie złącza PN (rozdz. 6.7).

8. Tranzystory bipolarne

8.1. Rodzaje tranzystorów

Tranzystory (z ang. *Transfer Resistor*) należą do grupy elementów półprzewodnikowych o regulowanym (sterowanym) przepływie nośników ładunku elektrycznego. Budowę i zasadę ich działania przedstawimy w dalszej części książki. Biorąc pod uwagę zasadę działania, tranzystory dzielimy na: bipolarne i unipolarne (polowe).

Tranzystory bipolarne są najczęściej wykonywane z *krzemu*, rzadziej z *germanu*. Ze względu na kolejność ułożenia warstw półprzewodnika rozróżniamy:

- tranzystory NPN,
- tranzystory PNP.

Mogą one być z:

- **jednorodną bazą** (dyfuzyjny),
- **niejednorodną bazą** (dryftowy).

Tranzystory polowe, zwane również w skrócie FET (ang. *Field Effect Transistor*), dzielimy na:

- **złączowe** (JFET — ang. *Junction FET*);
- **z izolowaną bramką** (IGFET lub MOSFET — ang. *Insulated Gate FET* lub *Metal Oxide Semiconductor FET*).

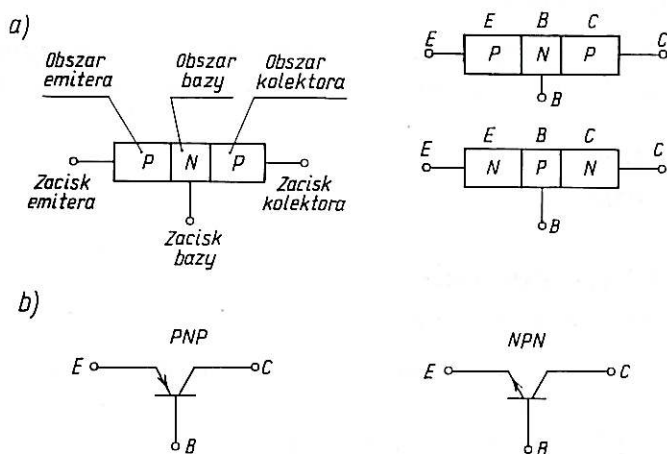
Ze względu na rodzaj charakterystyki prądowo-napięciowej rozróżniamy tranzystory z:

- **kanalem wzbogacanym** (normalnie wyłączone, tzn. kanał ma przeciwny typ przewodnictwa niż podłoże i przy braku zewnętrznej polaryzacji nie występuje w tranzystorze);
- **kanalem zubożanym** (normalnie załączone, tzn. w kanale jest mniej nośników niż w podłożu, przy braku zewnętrznej polaryzacji tranzystora kanał istnieje).

Tranzystory, tak jak i diody, mogą być: małej, średniej i dużej mocy. Maksymalna moc wydzielana w tranzystorze zależy od powierzchni zajmowanej przez tranzystor i od sposobu odprowadzania ciepła. Ze względu na zakres przetwarzanych częstotliwości, tranzystory dzielimy na małej i wielkiej częstotliwości. O zaliczeniu ich do którejś z tych grup decydują właściwości zastosowanego półprzewodnika, wymiary konstrukcyjne jego poszczególnych elementów oraz rodzaj i czas trwania procesów technologicznych, jakim były poddawane.

8.2. Struktura tranzystora

Tranzystor bipolarny składa się z trzech obszarów półprzewodnika o przeciwnym typie przewodnictwa, co powoduje powstanie dwóch złączy: PN i NP. Każdy z trzech obszarów półprzewodnika ma swoją nazwę: baza, emiter, kolektor, a złącza nazywa się — złączem emiterowym (złącze emiter-baza) i kolektorowym (złącze baza-kolektor). Na rysunku 8.1 przedstawiono modele struktury tranzystorów bipolarnych i odpowiadające im symbole graficzne.



Rys. 8.1. Modele struktury tranzystora (a) i odpowiadające im symbole graficzne (b) [1]

8.3. Praca tranzystora

8.3.1. Zasada działania

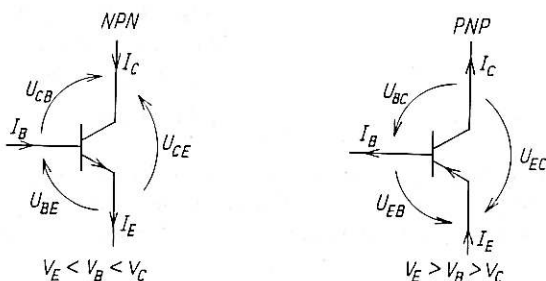
Zasadę działania tranzystora bipolarnego omówimy na przykładzie polaryzacji normalnej tranzystora, tzn. gdy złącze emiter-baza jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze baza-kolektor — w kierunku zaporowym. Stan taki jest zapewniony, jeżeli jest spełniona zależność między potencjałami na poszczególnych elektrodach:

- $V_E < V_B < V_C$ — dla tranzystora NPN;
- $V_E > V_B > V_C$ — dla tranzystora PNP.

Na rysunku 8.2 zaznaczono rozpływy prądów i spadki napięcia między poszczególnymi elektrodami, natomiast na rys. 8.3 — zasadę działania tranzystora NPN.

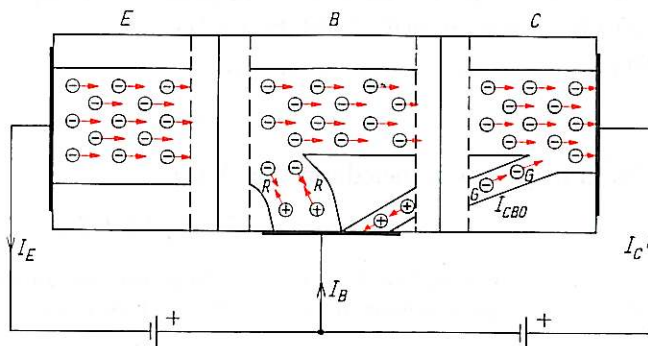
Rys. 8.2. Oznaczenie rozplywu prądu w tranzystorze i spadki napięcia na nim

I_B — prąd bazy, I_C — prąd kolektora, I_E — prąd emitera, U_{CE} — napięcie kolektor-emiter, U_{BE} — napięcie baza-emiter, U_{CB} — napięcie kolektor-baza, V_E — potencjał emitera, V_B — potencjał bazy, V_C — potencjał kolektora



Rys. 8.3. Zasada działania tranzystora NPN

I_B — prąd bazy, I_C — prąd kolektora, I_{CBO} — zerowy prąd kolektora, I_E — prąd emitera, E — emiter, B — baza, C — kolektor



W wyniku przyłożenia napięć do elektrod tranzystora (polaryzowanie złączy), elektrony jako nośniki większościowe przechodzą z emitera do bazy, gdzie stają się nośnikami mniejszościowymi i część z nich rekombinuje z dziurami wprowadzanymi przez kontakt bazy. Elektrony przechodzące przez złącze emiter-baza mają określone prędkości i jeżeli obszar

bazy będzie dostatecznie wąski (czas przelotu przez bazę krótszy od czasu rekombinacji), to prawie wszystkie przejdą (w wyniku unoszenia w silnym polu elektrycznym) do kolektora, gdzie staną się ponownie nośnikami większościowymi i zostaną usunięte z obszaru kolektora do obwodu zewnętrznego. **Stosunek ilości nośników (elektronów) przechodzących do kolektora, do ilości nośników (elektronów) wstrzykiwanych z emitera do bazy, nazywamy współczynnikiem wzmocnienia prądowego i oznaczamy α .** Ponieważ złącze baza-kolektor jest spolaryzowane w kierunku zaporowym, to oprócz omówionego prądu, w złączu płynie prąd związany z tą polaryzacją, tzw. **prąd zerowy kolektora** — I_{CBO} . Płynie on nawet wtedy, kiedy złącze baza-emiter jest niespolaryzowane ($I_E=0$). Przez tranzystor płynie również zerowy prąd I_{CEO} , gdy $I_B=0$. Powyższe rozważania można zapisać w postaci równań:

$$\begin{aligned} I_E &= I_B + I_C, \\ I_C &= \alpha I_E + I_{CBO}, \\ I_B &= (1 - \alpha) I_E - I_{CEO}, \\ \alpha &= \beta / (\beta + 1) \quad \text{lub} \quad \beta = \alpha / (1 - \alpha), \\ I_C &= \beta I_B + I_{CEO}, \end{aligned}$$

w których: α — współczynnik wzmocnienia prądowego, który może osiągać wartości od 0,952 do 0,998; β — współczynnik wzmocnienia prądowego, będący stosunkiem ilości nośników wstrzykiwanych do kolektora do ilości nośników w bazie ($\beta = 20 \div 850$).

8.3.2. Opis pracy tranzystora metodą ładunkową

Z poprzedniego rozdziału wynika, że w każdej chwili w obszarze bazy jest stały ładunek Q . W związku z tym prąd kolektora $I_C = Q/t_b$; przy czym t_b jest czasem przelotu nośników przez bazę.

Dla tranzystora z jednorodną bazą

$$t_b = w_b^2 / 2D_B.$$

Dla tranzystora z niejednorodną bazą

$$t_b = w_b^2 / 2D_B (1 + b/2),$$

przy czym: w_b — szerokość bazy, D_B — współczynnik dyfuzji nośników w bazie; $b = \ln N_0 / N_w$ (N_0, N_w — koncentracja nośników na początku i na końcu bazy).

Natomiast prąd bazy, opisujący prąd nośników ulegających rekombinacji, $I_B = Q/\tau_B$; przy czym τ_B jest czasem życia nośników mniejszościowych w bazie.

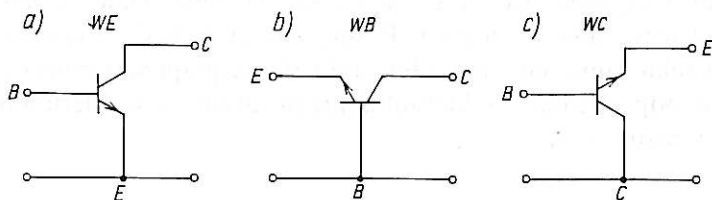
Na tej podstawie można określić współczynniki wzmocnienia prądowego:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 - t_b / \tau_B, \\ \beta &= \tau_B / t_b. \end{aligned}$$

8.4. Układy pracy tranzystora

Ponieważ tranzystor jest elementem trójkońcówkowym, to istnieje kilka sposobów włączenia go do układu. Na rysunku 8.4 przedstawiono trzy sposoby włączenia tranzystora do układu, zależnie od doprowadzenia i wyprowadzenia sygnału. Są to:

1. **Układ ze wspólnym emiterem OE (WE)** — rys. 8.4a.
2. **Układ ze wspólną bazą OB (WB)** — rys. 8.4b.
3. **Układ ze wspólnym kolektorem OC (WC)** — rys. 8.4c



Rys. 8.4. Układy pracy tranzystora: a) ze wspólnym emiterem (OE); b) ze wspólną bazą (OB); c) ze wspólnym kolektorem (OC) [6]

Wybór układu pracy jest zależny od przeznaczenia i rodzaju zastosowanego tranzystora.

Tranzystor pracujący w **układzie OE** jest najczęściej używany w układach elektronicznych, ponieważ charakteryzuje się:

- dużym wzmocnieniem prądowym ($\beta = I_C/I_B$);
- dużym wzmocnieniem napięciowym;
- dużym wzmocnieniem mocy.

Napięcie wyjściowe w układzie OE jest odwrócone w fazie o 180° w stosunku do napięcia wejściowego. Rezystancja wejściowa jest rzędu kilkuset Ω , a wyjściowa wynosi kilkadziesiąt $k\Omega$.

Tranzystor pracujący w **układzie OB** ma:

- małą rezystancję wejściową;
- bardzo dużą rezystancję wyjściową;
- wzmocnienie prądowe bliskie jedności ($\alpha = I_C/I_E$).

Tranzystor w tym układzie pracuje przy bardzo dużych częstotliwościach granicznych, niekiedy nawet rzędu GHz.

Tranzystor pracujący w **układzie OC** charakteryzuje się:

- dużą rezystancją wejściową (co ma istotne znaczenie we wzmacniaczach małej częstotliwości);
- wzmocnieniem napięciowym równym jedności (stąd jest nazywany również wtórnikami emiterowym);
- dużym wzmocnieniem prądowym ($\beta + 1 = I_E/I_B$).

8.5. Charakterystyki statyczne tranzystora

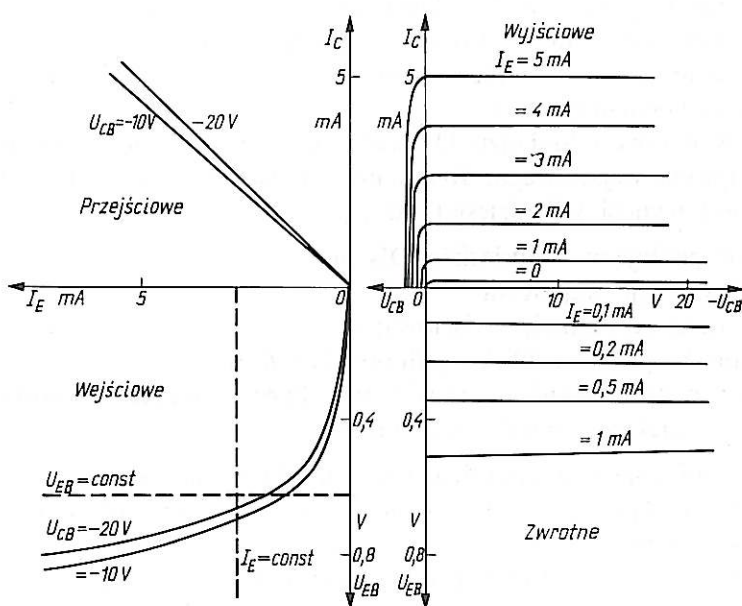
Tranzystor pracujący w dowolnym układzie pracy (patrz rozdz. 8.4) charakteryzują prądy przez niego płynące i napięcia panujące na jego zaciskach. W związku z tym można określić cztery rodziny **charakterystyk statycznych**:

- wejściowa ($U_1 = f(I_1)$, przy $U_2 = \text{const}$);
- przejściowa ($I_2 = f(I_1)$, przy $U_2 = \text{const}$);
- wyjściowa ($I_2 = f(U_2)$, przy $I_1 = \text{const}$);
- zwrotna ($U_1 = f(U_2)$, przy $I_1 = \text{const}$).

Znając charakterystykę wejściową i wyjściową (podawane w katalogach), można wyznaczyć dwie pozostałe. Postać charakterystyki wejściowej i wyjściowej jest taka sama, jak charakterystyki złącza półprzewodnikowego polaryzowanego odpowiednio w kierunku przewodzenia i w kierunku zaporowym (patrz rozdz. 6.3).

8.5.1. Charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OB

Na rysunku 8.5 przedstawiono rodziny charakterystyk statycznych tranzystora w układzie OB, w którym $I_1 = I_E$, $U_1 = U_{EB}$, $I_2 = I_C$, $U_2 = U_{CB}$. Charakterystyki wejściowe w rzeczywistości nie przecinają się w jednym punkcie, jest to spowodowane tym, że istnieje pewien spadek napięcia na rezystancji rozproszonej bazy ($r_{bb'}$). Występujące przesunięcie charakterystyk



Rys. 8.5. Charakterystyki statyczne tranzystora PNP w układzie OB [8]

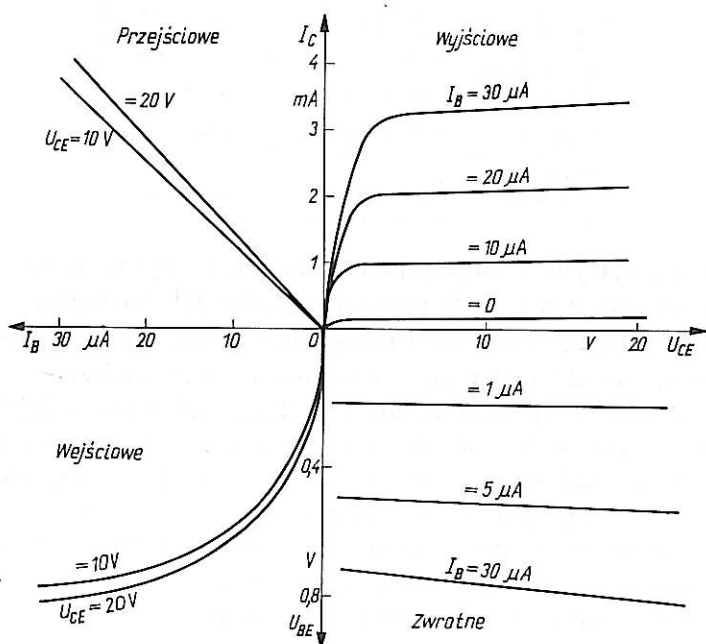
względem siebie jest związane ze zjawiskiem Early'ego (modulacja szerokości bazy). Jest to tzw. oddziaływanie wsteczne w tranzystorze, które silniej występuje w tranzystorach z jednorodną bazą. Przesunięcie względem siebie charakterystyk wyjściowych jest natomiast związane ze sterowaniem prądu kolektora przez prąd emitera. Charakterystyka wyjściowa osiąga nasycenie, ale nie jest płaska, lecz nieznacznie wzrasta, co jest spowodowane modulacją efektywnej szerokości bazy.

Charakterystyki przejściowe, to linie proste nachylone pod kątem α (współczynnik wzmocnienia prądowego). Charakterystyki zwrotne powinny być natomiast liniami prostymi, równoległymi do osi napięcia U_{CB} , jednak tak nie jest w wyniku oddziaływania wstecznego w tranzystorze. Wpływ modulacji szerokości bazy jest tym silniejszy, im większy jest prąd emitera.

8.5.2. Charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OE

Na rysunku 8.6 przedstawiono rodzinę charakterystyk statycznych tranzystora w układzie OE, gdzie $I_1 = I_B$, $U_1 = U_{BE}$, $I_2 = I_C$, $U_2 = U_{CE}$.

[Przesunięcie względem siebie charakterystyk wejściowych jest związane z modulacją szerokości bazy, natomiast przesunięcie charakterystyk wyjściowych — oddziaływaniem prądu bazy na prąd kolektora.] Tak jak i w układzie OB, charakterystyki osiągają nasycenie, a ich nachylenie nie jest stałe, ale rośnie (jest większe niż w układzie OB, ponieważ część napięcia U_{CE}



Rys. 8.6. Charakterystyki statyczne tranzystora NPN w układzie OE [8]

polaryzuje złącze emiter-baza). Charakterystyka przejściowa jest linią prostą o nachyleniu β (współczynnik wzmocnienia prądowego). Wygląd charakterystyk zwrotnych jest natomiast podobny do tych samych charakterystyk układu OB. Powyższe charakterystyki są najbardziej przydatne do analizy graficznej pracy tranzystora w układzie wzmacniacza.

8.6. Stany pracy i parametry tranzystora

Tranzystor składa się z dwóch złączy PN, które mogą być spolaryzowane w kierunku zaporowym lub przewodzenia. W związku z tym można wyróżnić cztery **stany pracy tranzystora** (tab. 8.1):

1. **Aktywny.**
2. **Nasycenia.**
3. **Zatkania.**
4. **Inwersyjny.**

Tabela 8.1

Stany pracy tranzystora i odpowiadająca im polaryzacja złącza [15]

Stan tranzystora	Kierunki polaryzacji złączy tranzystora	
	złącze emiter-baza	złącze kolektor-baza
Zatkanie	zaporowy	zaporowy
Przewodzenie aktywne	przewodzenia	zaporowy
Nasylenie	przewodzenia	przewodzenia
Przewodzenie inwersyjne	zaporowy	przewodzenia

Tranzystor pracujący w układach analogowych musi być w stanie aktywnym, a w układach cyfrowych — w stanach zatkania lub nasycenia.

Parametry określające właściwości tranzystora możemy podzielić na statyczne (graniczne, charakterystyczne i maksymalne) i dynamiczne.

Parametry statyczne są to parametry określające zależności między prądami i napięciami stałymi doprowadzonymi do tranzystora (rezystancja rozproszona bazy, współczynnik wzmocnienia prądowego, prądy zerowe). Umożliwiają one określenie punktu pracy tranzystora.

Parametry graniczne określają dopuszczalne wartości: napięć, prądów, temperatury i mocy, które mogą wystąpić w tranzystorze, a ich przekroczenie powoduje uszkodzenie lub zniszczenie tranzystora.

Parametry charakterystyczne są to typowe wartości parametrów określających tranzystor (poszczególne prądy i napięcia, współczynnik wzmoc-

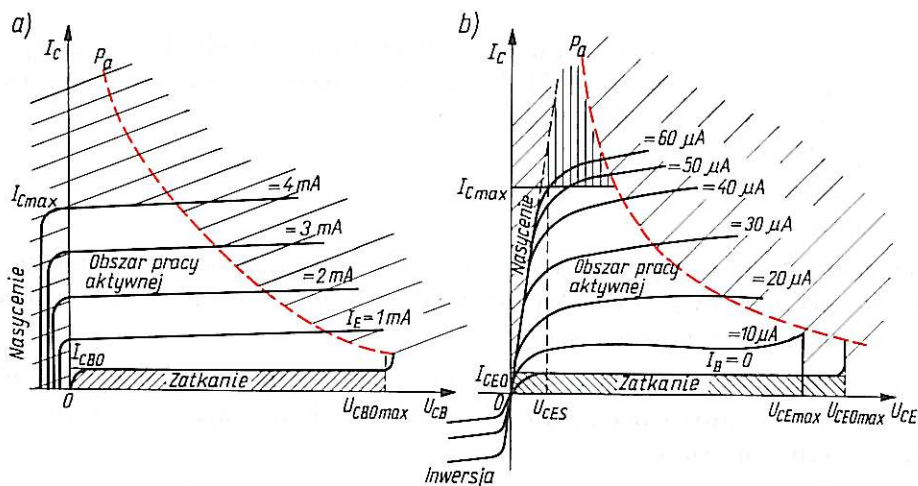
nienia prądowego, rezystancja bazy, pojemności złączone, pulsacja graniczna).

Parametry maksymalne są największymi wartościami prądów lub napięć, po przekroczeniu których gwałtownie pogarszają się pozostałe parametry tranzystora, ale nie następuje jego uszkodzenie.

Parametry dynamiczne określają właściwości tranzystora w wybranym punkcie pracy, gdy zostanie onysterowany przemiennym napięciem lub prądem (czas włączania i wyłączania tranzystora).

8.6.1. Obszar pracy aktywnej

Na rysunku 8.7 przedstawiono obszar pracy aktywnej tranzystora w konfiguracji OB i OE. Jest on ograniczony od góry maksymalnym prądem kolektora, a od dołu prądem zerowym, płynącym przez tranzystor w danym układzie (poniżej znajduje się obszar zatkania). Ze strony lewej ograniczenie stanowi obszar nasycenia, a z prawej — krzywa (hiperbola) $P_a = UI$, która określa maksymalną moc, jaka może być wydzielona w tranzystorze, i wartość napięcia przebicia.



Rys. 8.7. Obszary pracy tranzystora w układzie OB (a) i w układzie OE (b); [6]

8.6.2. Napięcia przebicia

Z wartością napięć przebicia są związane maksymalne wartości napięć (U_{CBOmax} , U_{CEOmax}), jakie mogą być doprowadzone między poszczególne elektrody tranzystora. **W tranzystorze mamy do czynienia z trzema rodzajami przebicia:**

- 1) **związane ze zjawiskiem Zenera** (patrz rozdz. 6.4) — przebicie złącza emiter-baza tranzystora dryftowego;

- 2) **związane ze zjawiskiem lawinowym** (patrz rozdz. 6.4) — przebicie złącza baza-kolektor lub emiter-baza tranzystora z jednorodną bazą;
- 3) **skrośne** — wywołane rozszerzeniem się warstwy zaporowej złącza kolektor-baza na cały obszar bazy, w wyniku czego nośniki z emitera przechodzą bez strat do kolektora.

Wartość napięcia przebicia tranzystora pracującego w układzie OB jest większa niż w układzie OE ($U_{CEO\max} = (I_3 \div I_2) U_{CBO\max}$).

Czasami w tranzystorze występuje przebicie wtórne. Jest ono związane z tym, że w niewielkim obszarze złącza następuje wydzielanie dużej ilości ciepła, co powoduje uszkodzenie termiczne tranzystora (dużej mocy i częstotliwości).

Tranzystor pracujący przy napięciach bliskich wartości napięcia przebicia lawinowego może być wykorzystany do generacji impulsów o stromych zboczach.

8.7. Schematy zastępcze tranzystora

Schematy zastępcze tranzystora wykorzystujemy wtedy, kiedy chcemy przeprowadzić analizę pracy danego układu elektronicznego. Poniżej omówimy trzy podstawowe schematy zastępcze tranzystora:

1. Typu II.
2. Hybrydowy.
3. Ebersa-Molla.

Schemat zastępczy typu II tranzystora jest stosowany przy określaniu punktu pracy i parametrów roboczych (rezystancja wejściowa i wyjściowa, wzmocnienie) układów elektronicznych.

Schemat hybrydowy służy również do określania parametrów układów elektronicznych. Wartości parametrów h określa się korzystając z charakterystyk statycznych tranzystora.

Model Ebersa-Molla jest wykorzystywany do analizy pracy układów impulsowych i cyfrowych.

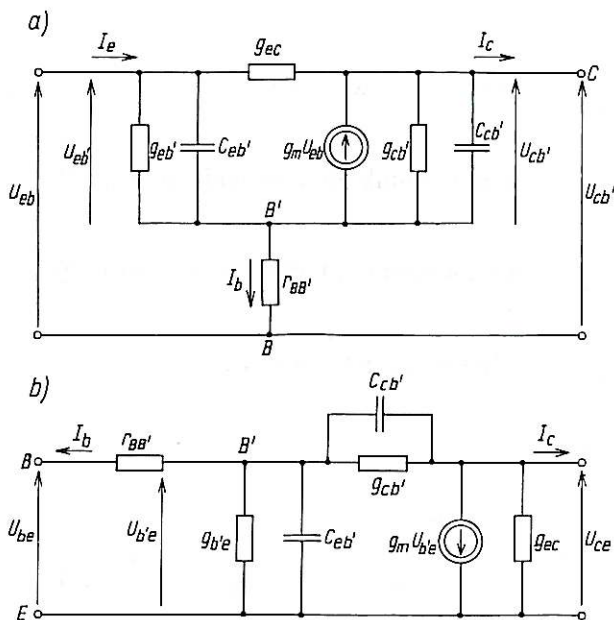
8.7.1. Schemat zastępczy typu II

Schemat zastępczy, jak również odpowiadający mu model fizyczny, jest tworzony na podstawie zjawisk zachodzących wewnątrz tranzystora. Przeanalizujmy go na przykładzie tranzystora pracującego w układzie OE. Każdy obszar półprzewodnika ma pewną rezystancję. W schemacie zastępczym uwzględniamy tylko **rezystancję bazy** $r_{BB'}$, ponieważ ma ona największą wartość (ok. 100 Ω). Uwzględnia się ją głównie przy dużych częstotliwościach.

ciach. Ze zmianą napięcia $U_{b'e}$ zmienia się prąd bazy i kolektora. W związku z tym można określić następujące parametry układu:

- **konduktancję wejściową** — $g_{b'e} = (1 - \alpha)I_E / U_T$ (1 mS);
- **transkonduktancję** — $g_m = \alpha I_E / U_T$, która reprezentuje sterowanie prądu kolektora prądem emitera.

10



Rys. 8.8. Schemat zastępczy typu Π tranzystora dla układu OB (a) i układu OE (b) [1]

Nachylenie charakterystyki $I_C(U_{CE})$ jest reprezentowane przez **konduktancję wyjściową** g_{ce} (20 μ S). Natomiast zjawisko Early'ego reprezentuje $g_{cb'}$ (0,5 μ S). Oprócz omówionych parametrów, każde złącze ma **pojemność złączową i dyfuzyjną** (patrz rozdz. 6.6.1). Całkowita pojemność złącza kolektor-baza ($C_{cb'} = 10$ pF) stanowi sprzężenie między obwodem wyjściowym a wejściowym. Całkowita pojemność złącza emiter-baza ($C_{eb'} = 200$ pF) wpływa na wzmocnienie przy większych częstotliwościach. Pełny schemat zastępczy tranzystora pracującego w konfiguracji OE i OB pokazano na rys. 8.8. Związek między konduktancjami wejściowymi obu konfiguracji jest następujący:

$$g_{b'e} = (1 - \alpha)g_{eb'} ,$$

przy czym $g_{eb'} = I_E / U_T$.

8.7.2. Schemat zastępczy hybrydowy

Jeżeli tranzystor potraktujemy jako czwórnik, to możemy w następujący sposób opisać napięcie na wejściu i prąd wyjściowy tranzystora pracującego w konfiguracji OE:

$$\begin{aligned} U_{BE} &= h_{11} I_B + h_{12} U_{CE} , \\ I_C &= h_{21} I_B + h_{22} U_{CE} , \end{aligned}$$

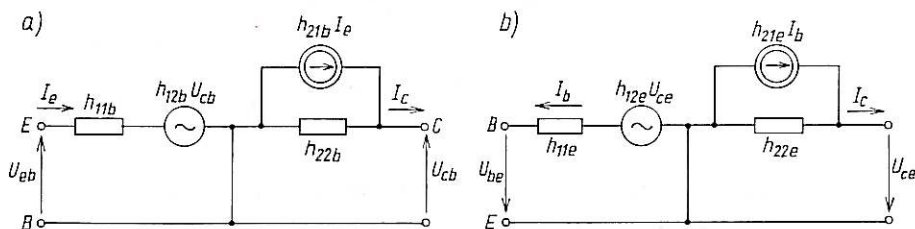
przy czym:

$$h_{11} = \left. \frac{U_{BE}}{I_B} \right|_{U_{CE}=0} \quad \text{impedancja wejściowa,}$$

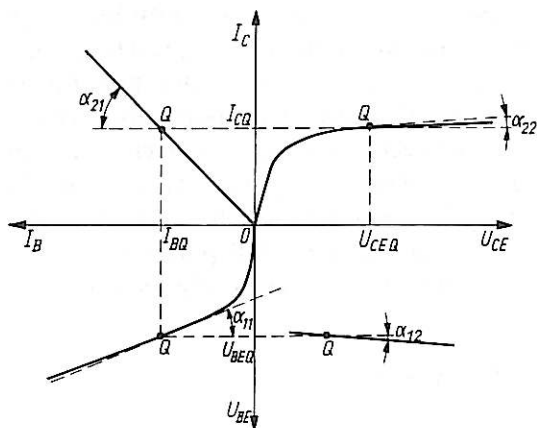
$$h_{12} = \left. \frac{U_{BE}}{U_{CE}} \right|_{I_B=0} \quad \text{współczynnik przenoszenia wstecznego,}$$

$$h_{21} = \left. \frac{I_C}{I_B} \right|_{U_{CE}=0} \quad \text{współczynnik przenoszenia prądowego,}$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_C}{U_{CE}} \right|_{I_B=0} \quad \text{admitancja wyjściowa.}$$



Rys. 8.9. Schemat zastępczy hybrydowy tranzystora dla układu OB (a) i układu OE (b) [1]



Rys. 8.10. Sposób wyznaczania parametrów h tranzystora
 $h_{11} = \tan \alpha_{11}$, $h_{12} = \tan \alpha_{12}$, $h_{21} = \tan \alpha_{21}$, $h_{22} = \tan \alpha_{22}$
 Q — punkt pracy

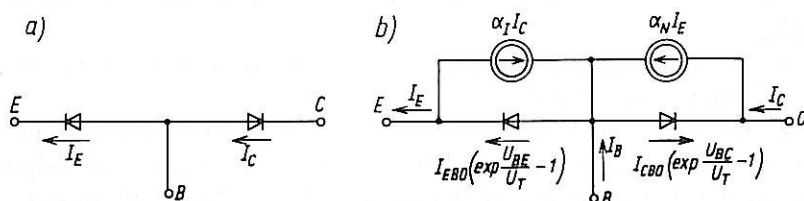
Układ zastępczy tranzystora dla tak określonych parametrów jest pokazany na rys. 8.9, a graficzna interpretacja tych parametrów na rys. 8.10.

8.7.3. Schemat zastępczy (model) Ebersa-Molla (stany pracy tranzystora)

Schematem zastępczym, który opisuje wszystkie stany pracy tranzystora, jest tzw. model Ebersa-Molla. W tym modelu tranzystor składa się z dwu złączy: NP i PN połączonych szeregowo (rys. 8.11a), które oddziałują wzajemnie na siebie. To oddziaływanie jest reprezentowane przez źródła prądowe $\alpha_N I_E$ i $\alpha_I I_C$ (rys. 8.11b), a prądy płynące przez tranzystor można określić wzorami:

$$\begin{aligned} I_E &= \alpha_I I_C + I_{EBO} [\exp(U_{BE}/U_T) - 1], \\ I_C &= \alpha_N I_E + I_{CBO} [\exp(U_{BC}/U_T) - 1], \end{aligned}$$

w których: α_I — współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora dla pracy inwersyjnej, α_N — współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora dla pracy normalnej.



Rys. 8.11. Schemat zastępczy Ebersa-Molla tranzystora: a) uproszczony model; b) pełny schemat [6]

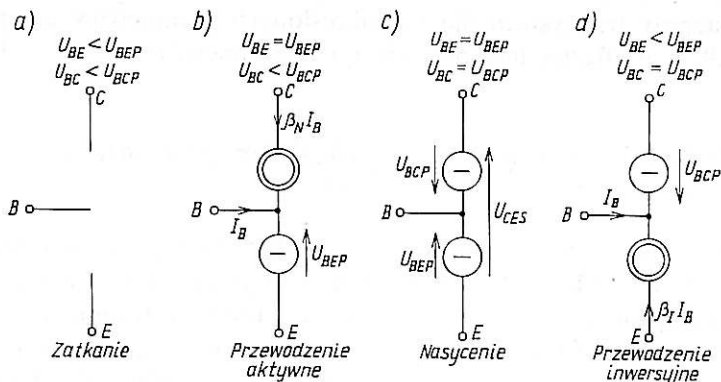
Współczynniki te są powiązane zależnością

$$\alpha_N I_{EBO} = \alpha_I I_{CBO}.$$

Wzmocnienie tranzystora pracującego w stanie aktywnym jest dużo większe niż w stanie inwersyjnym. Na przykład: dla tranzystora BC107 $\beta_N = \alpha_N / (1 - \alpha_N) = 200$, a $\beta_I = \alpha_I / (1 - \alpha_I) = 4$.

Po dokonaniu aproksymacji odcinkowo-liniowej charakterystyki diody (patrz rozdz. 7), otrzymujemy **odcinkowo-liniowe modele tranzystora** dla różnych stanów pracy. Stosujemy je podczas analizy układów impulsowych do obliczania punktu pracy tranzystorów jak również podczas analizy liniowych i nieliniowych układów analogowych.

W stanie zatkania tranzystora, złącza są polaryzowane w kierunku zaporowym, co odpowiada rozwarciu między kolektorem i emiterem (rys. 8.12a). W tym stanie przez złącze kolektor-baza płynie prąd zerowy I_{CBO} , a przez



Rys. 8.12. Modele tranzystora odpowiadające jego stanom pracy [9]

β_N — współczynnik wzmocnienia prądowego w kierunku normalnym, β_I — współczynnik wzmocnienia prądowego w kierunku inwersyjnym, I_B — prąd bazy, U_{CES} — napięcie nasycenia tranzystora, U_{BCP} — napięcie przewodzenia złącza kolektorowego, U_{BEP} — napięcie przewodzenia złącza emiterowego

złącze emiter-baza — prąd I_{CEO} . Zatem, całkowite zatkanie następuje przy $I_B = -I_{CBO}$.

Stan aktywny tranzystora omówiono wcześniej (patrz rozdz. 8.6.1); odpowiada mu schemat z rys. 8.12b.

W stanie nasycenia tranzystora, oba złącza są polaryzowane w kierunku przewodzenia, a przez tranzystor płynie prąd maksymalny, co odpowiada zwarcu między kolektorem a emiterem (rys. 8.12c). Napięcie między kolektorem a emiterem nosi nazwę **napięcia nasycenia** — U_{CES} i wynosi ok. 0,2 V. W stanie inwersyjnym, kolektor przejmuje funkcję emitera, a emiter — kolektora (rys. 8.12d); współczynnik wzmocnienia prądowego $\beta_I < \beta_N$.

8.8. Częstotliwości graniczne tranzystora

Ze wzrostem częstotliwości sygnału wejściowego maleje wartość wzmocnienia prądowego, ponieważ coraz bardziej zaznacza się wtedy wpływ pojemności tranzystora. Częstotliwość, przy której moduł współczynnika wzmocnienia prądowego ($\beta = h_{21e}$) maleje do jedności — nazywa się **częstotliwością graniczną** tranzystora.

$$f_T = \frac{\omega_T}{2\pi} ,$$

przy czym $\omega_T = \frac{g_m}{C_{b'e} + C_{b'c}}$ jest **pulsacją graniczną** (pole wzmocnienia).

Określa się jeszcze trzy inne częstotliwości graniczne:

f_α — dla układu wspólnej bazy (OB), przy której współczynnik wzmocnienia prądowego maleje do 0,707 wartości maksymalnej (tj. o 3 dB);

f_β — dla układu wspólnego emitera (OE). Pasma przenoszenia tranzystora w danej konfiguracji jest określane jako różnica górnej (f_α , f_β) i dolnej (0 Hz) częstotliwości, dla których wartość wzmocnienia jest mniejsza o 3 dB od wartości maksymalnej. Na rysunku 8.13 przedstawiono związek między tymi częstotliwościami.

$$f_\beta = f_T / \beta;$$

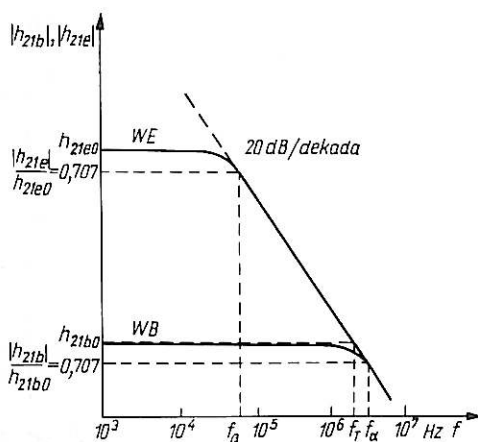
$$f_T = 0,8 f_\alpha ;$$

$$f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} ,$$

$$f_\alpha = \frac{g_{eb'}}{2\pi C_{eb'}};$$

Rys. 8.13. Częstotliwości graniczne tranzystora [1]

f_β — częstotliwość graniczna tranzystora pracującego w konfiguracji OE, f_α — częstotliwość graniczna tranzystora pracującego w konfiguracji OB, f_T — częstotliwość, przy której wzmocnienie prądowe tranzystora pracującego w konfiguracji OE maleje do jednej, h_{21bo} — wzmocnienie prądowe dla zakresu średnich częstotliwości dla tranzystora w konfiguracji OB, h_{21eo} — wzmocnienie prądowe dla zakresu średnich częstotliwości dla tranzystora w konfiguracji OE



$f_{\max}$ — **maksymalna częstotliwość generacji**; największa częstotliwość, przy której tranzystor może pracować w układzie generatora. Odpowiada to wzmocnieniu mocy równemu jedności.

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi r_{BB'} C_{Tc}}} ,$$

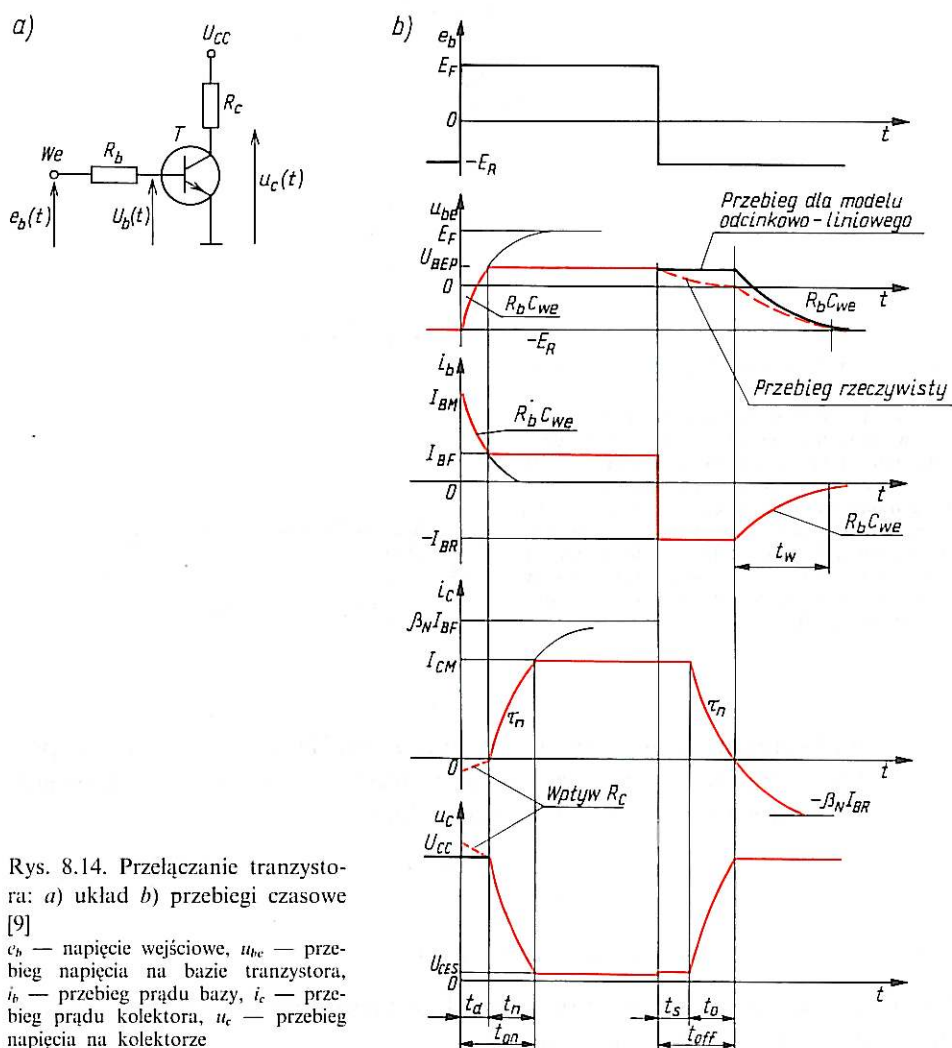
przy czym C_{Tc} jest pojemnością złącza kolektorowego.

Częstotliwości graniczne w tranzystorach z niejednorodną bazą są większe niż w tranzystorach z jednorodną bazą.

8.9. Przełączanie tranzystora

Na rysunku 8.14 przedstawiono układ tranzystora i przebiegi sygnałów uzyskane w wyniku przełączania tranzystora. Cykl przełączania zaczniemy omawiać od chwili, w której napięcie na generatorze ma wartość $-E_R$. Tranzystor jest wówczas zatkany ($t=0$). W chwili przełączenia napięcia na generatorze na wartość E_F , prąd bazy wzrośnie skokowo do wartości

$$I_{BM} = \frac{E_F + E_R}{R_b}.$$



Jest to związane z tym, że tranzystor w stanie zatkania zachowuje się tak samo jak kondensator. Ponieważ kondensator jest elementem bezwładnościowym, to napięcie na nim nie zmienia się skokowo. W związku z tym cały skok napięcia, jaki pojawił się na wejściu, odłoży się na rezystorze R_b — powodując skokowy wzrost prądu bazy. Prąd ten będzie wpływał do bazy, doładowując pojemność złączową, co z kolei będzie powodowało zmniejszanie prądu bazy.

Gdy napięcie na bazie osiągnie poziom U_{BEP} , wówczas złącze baza-emiter zostanie spolaryzowane w kierunku przewodzenia, co powstrzyma narastanie napięcia na bazie. Prąd bazy ustabilizuje się na poziomie

$$I_{BF} = \frac{E_F - U_{BEP}}{R_b}.$$

W tym czasie (t_d) napięcie na bazie rośnie od wartości $-E_R$ do wartości U_{BEP} . Tranzystor nadal jest zatkany i prąd przez kolektor nie płynie. Napięcie na kolektorze jest równe napięciu zasilania U_{CC} . W chwili osiągnięcia przez bazę napięcia o wartości U_{BEP} (czas t_d), tranzystor zaczyna pracować aktywnie. Cykl ten jest analogiczny do przełączania diody (patrz rozdz. 6.7).

$$t_d = R_b C_{we} \ln \frac{E_F + E_R}{E_F - U_{BEP}},$$

przy czym C_{we} jest pojemnością wejściową tranzystora.

Od tej chwili prąd i napięcie bazy są stałe. Prąd kolektora zaczyna natomiast rosnąć, i osiąga wartość I_{CM} , gdy tranzystor wejdzie w stan nasycenia.

$$I_{CM} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C}.$$

Wzrostowi prądu kolektora towarzyszy zmniejszanie się napięcia na kolektorze do wartości nasycenia U_{CES} , którą osiąga w czasie

$$t_n = \tau_n \ln \frac{\beta_N I_{BF}}{\beta_N I_{BF} - I_{CM}},$$

przy czym: $\tau_n = \beta_N (t_b + C_{Te} R_C)$, t_b — czas przelotu nośników przez bazę.

Cykl włączania tranzystora kończy się.

Wyłączanie tranzystora rozpoczyna się natomiast w chwili zmiany napięcia na generatorze z wartości E_F na $-E_R$. Przez bazę zaczyna płynąć prąd I_{BR} , którego zadaniem jest wyprowadzenie nośników prądu z bazy.

$$I_{BR} = \frac{E_R + U_{BEP}}{R_b}.$$

Początkowo prąd kolektora po minimalnym zmniejszeniu, utrzymuje się na stałym poziomie w tzw. **czasie przeciągania**

$$t_s = \tau_s \ln \frac{\beta_N I_{BF} + \beta_N I_{BR}}{\beta_N I_{BR} + I_{CM}},$$

przy czym τ_s jest czasem życia nośników.

Zjawisko to jest związane z rozładowaniem pojemności dyfuzyjnej, która została naładowana, gdy tranzystor był w stanie nasycenia. Po tym czasie następuje wyprowadzenie tranzystora ze stanu zatkania do stanu aktywnego. Nieznacznie zmienia się prąd i napięcie na kolektorze. Napięcie na bazie stopniowo maleje, aż osiągnie wartość zero. W tym czasie (t_0) prąd kolektora maleje do zera, a napięcie na nim osiąga wartość U_{CC} :

$$t_0 = \tau_n \ln \frac{\beta_N I_{BR} + I_{CM}}{\beta_N I_{BR}}.$$

W tej chwili kończy się proces wyłączania tranzystora. Napięcie na bazie zmniejsza się od zera do wartości $-E_R$. Prąd bazy zwiększa się i osiąga wartość zero po czasie $t_w = 2,3 R_b C_{we}$.

Przykład

Gdy przyjmimy następujące wartości: $E_F = 4$ V, $E_R = 1$ V, $R_b = 7,5$ k Ω , $R_c = 470$ Ω , $U_{CC} = 6$ V, $C_{Tc} = 3$ pF, $C_{we} = 11$ pF, $t_b = 1$ ns, $\tau_s = 100$ ns, $\beta_N = 125$, wówczas otrzymamy następujące czasy przełączania: $t_d = 34$ ns, $t_n = 75,4$ ns, $t_s = 72,3$ ns i $t_0 = 108,3$ ns.

8.10. Podział tranzystorów bipolarnych i ich zastosowanie

Najważniejszymi parametrami tranzystorów są:

- **wzmocnienie prądowe** w układzie OE, przy określonym prądzie kolektora i napięciu kolektor-emiter;
- **napięcie nasycenia**, przy określonym prądzie bazy i kolektora;
- **prąd zerowy**, przy określonym napięciu kolektor-baza lub kolektor-emiter;
- **częstotliwość graniczna**;
- pojemność złącza kolektorowego;
- **czas wyłączania**;
- stała czasowa związana z rezystancją rozproszoną bazy;
- **maksymalna moc** wydzielana.

Klasyfikację tranzystorów bipolarnych najczęściej przeprowadza się ze względu na wydzielaną w nich moc i ich maksymalną częstotliwość generacji (tab. 8.2). Tranzystory te mają różne typy obudowy, w związku z tym położenie wyprowadzeń końcówek jest różne (rys. 8.15).

Tabela 8.2

Rodzaje tranzystorów bipolarnych i ich parametry

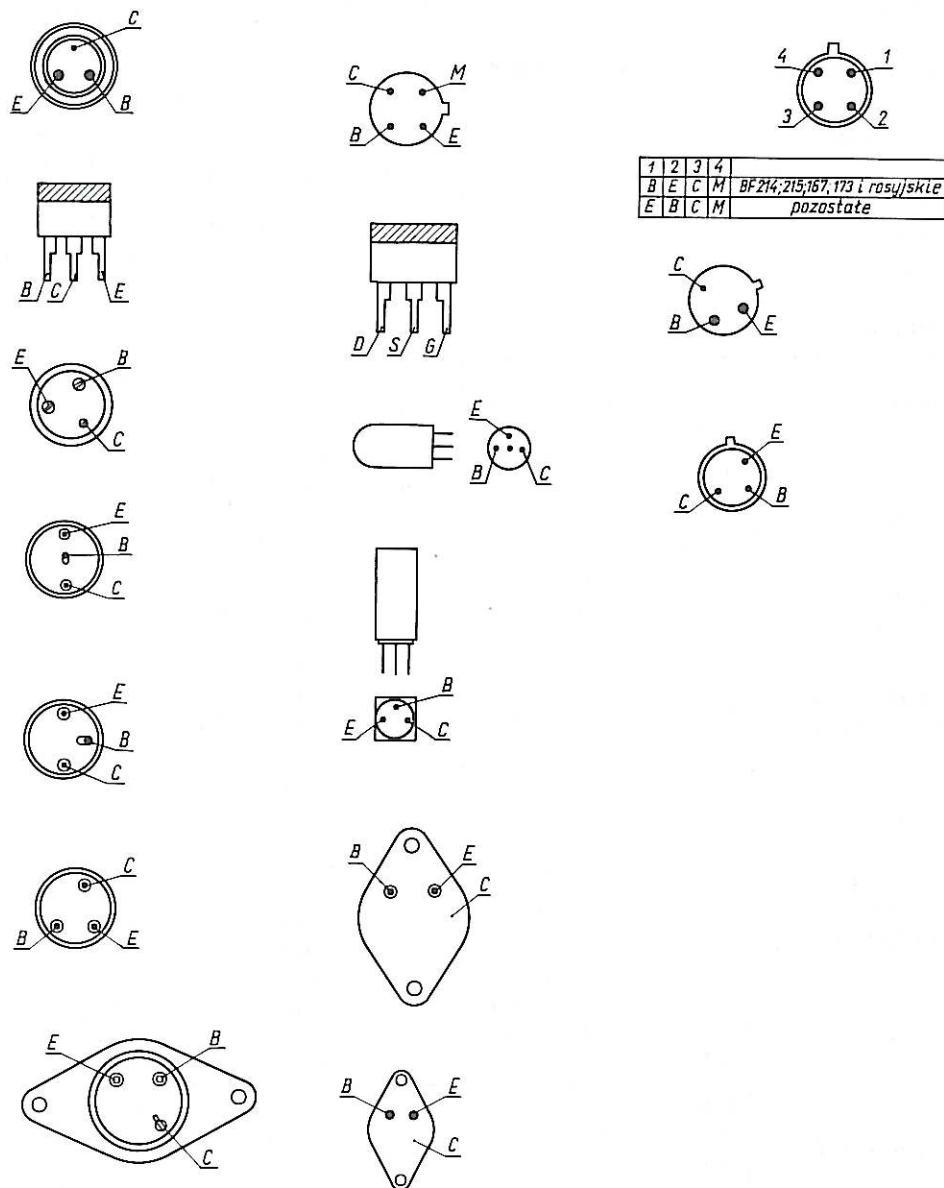
Rodzaj tranzystora	Parametr							
	P [W]	h_{21E}	I_C [A]	U_{CEsat} [V]	I_{CO} [μA]	f_T [MHz]	C [pF]	t_{off} [μs]
małej mocy, m.cz.	0,15 do 0,5	30 ÷ 900	2 m 0,1	0,1 ÷ 0,3 0,7	0,015 do 0,1	100 do 300	2,5 do 7	0,85
małej mocy, w.cz. (ukł. hybrydowe)	0,2	35 ÷ 225	1 m	—	0,1	200 260	1	—
małej mocy, wys. napięcia	0,4 0,83	> 50	10 m 25 m	0,3	0,01 0,05	50 60	1,6 7	—
średniej mocy, m.cz.	3,4 3,5 4,25	20 ÷ 250	0,15	0,8 1	0,1 0,3	50 180 250	25 30	0,3 0,85
średniej mocy, w.cz.	5	10 ÷ 200	0,25	1	0,5 20	250 300 400	10	—
średniej mocy, wys. napięcia	4 5 9,5	> 15 > 25	30 m	0,9 1 1,2	0,05 0,5	40 70	4	—
mocy	6,5 do 125	15 ÷ 300	50 m 0,03 do 5	0,4 do 2	0,05 do 1000	1 do 210	30 do 250	0,6 1,5
mocy przełączający	50 do 87,5	7,5 ÷ 180	0,5 do 5	0,35 do 1,3	500 do 4000	10	300	1,5 do 2,5
w.cz	0,12 do 0,3	15 ÷ 220	1 m do 20m	0,5	0,1 0,5	100 do 600	0,25 do 0,8	—
w.cz. (głowice VHF)	0,16 do 0,3	20 ÷ 330	1 m 4 m 8 m	—	0,1 0,06	150 do 1200	0,13 do 1	—

Ze względu na wydzielaną moc, tranzystory dzielimy na:

1. **Małej mocy** — do 0,3 W.
2. **Średniej mocy** — do 5 W.
3. **Dużej mocy** — powyżej 5 W, nawet do 300 W.

Biorąc pod uwagę maksymalną częstotliwość generacji, rozróżniamy tranzystory:

1. **Małej częstotliwości (m.cz.)** — do kilkudziesięciu MHz.
2. **Wielkiej częstotliwości (w.cz.)** — nawet do kilku GHz.



Rys. 8.15. Obudowy tranzystorów z zaznaczonymi wyprowadzeniami końcówek

Przykładowe oznaczenia tranzystorów produkcji polskiej:

- małej mocy i małej częstotliwości — BC107, BCAP07, C108;
- małej mocy, wielkiej częstotliwości — BSF18, stosowane w układach hybrydowych;
- małej mocy, wysokiego napięcia (napięcie od kilku do kilkunastu kV) — BC393, BCAP93, BF422;

- średniej mocy, małej częstotliwości BC211, BCAP11, C211;
- średniej mocy, wielkiej częstotliwości — BFCP99, BFP990, BFYP99;
- średniej mocy, wysokiego napięcia — BF257, BFAP57, F257;
- mocy, wysokiego napięcia — BD127, BF457, D127;
- mocy, małej częstotliwości — BDAP35, BDP491, D135;
- mocy, przełączający — BDCP25, BDY23, BU406, D23, U406;
- wielkiej częstotliwości — BFAP19, BFP519, F167.

Przy produkcji tranzystorów dąży się do osiągnięcia jak największej wartości iloczynu wydzielanej mocy i maksymalnej częstotliwości generacji. Dużą wartość wydzielanej mocy mają tranzystory, których powierzchnia złącza baza-kolektor jest duża. Natomiast dużą wartością częstotliwości generacji odznaczają się tranzystory o bardzo małej rezystancji rozproszonej bazy i pojemności złącza kolektorowego oraz o bardzo dużej częstotliwości granicznej (tranzystor w układzie OB).

Tabela 8.3

Parametry tranzystorów w zależności od konfiguracji [1]

Polączenie Parametr	OB	OE	OC
Rezystancja wejściowa	mała (kilkadziesiąt omów)	średnia (kilkaset omów)	bardzo duża (kilkaset kiloomów)
Rezystancja wyjściowa	bardzo duża (kilkaset kiloomów)	duża (kilkadziesiąt kiloomów)	mała (kilkadziesiąt omów)
Wzmocnienie prądowe (przenoszenie prądowe)	niewiele mniejsze od jedności	kilka do kilkuset	kilka do kilkuset
Wzmocnienie napięciowe	kilkaset do kilku tysięcy	kilkaset do kilku tysięcy	niewiele mniejsze od jedności
Wzmocnienie mocy	kilka tysięcy	kilka do kilkudziesięciu tysięcy	kilkadziesiąt tysięcy
Napięcie sygnału wejściowego i wyjściowego przy małych częstotliwościach	w fazie	odwrócone o 180°	w fazie
Częstotliwość graniczna 3 dB spadku wzmocnienia prądowego	duża, równa f_x	mała, równa f_β	mała, równa f_β
Częstotliwość graniczna spadku wzmocnienia napięciowego	duża, rzędu f_T	duża, rzędu f_T	bardzo duża, większa od f_T

Układy elektroniczne z tranzystorami germanowymi mogą być zasilane ze źródeł o niższym napięciu około 1,5 V, natomiast z tranzystorami krzemowymi — ze źródeł o napięciu około 6 V. Poza tym tranzystory germanowe można stosować w układach, w których pracują one przy większych częstotliwościach granicznych niż tranzystory krzemowe. Tranzystory germanowe charakteryzują się mniejszymi napięciami na złączach w stanie przewodzenia i większymi prądami zerowymi niż tranzystory krzemowe.

Tranzystory pracujące w różnych konfiguracjach mają różne parametry, które zebrano w tab. 8.3.

W układach bardzo wielkiej częstotliwości stosuje się tranzystory w konfiguracji OB.

We wzmacniaczach przeciwobnych stosuje się pary tranzystorów typu NPN oraz PNP, które mają bardzo zbliżone parametry. Nazywa się je **tranzystorami komplementarnymi**. Tranzystory te są przeciwnie spolaryzowane; prądy w nich płynące mają przeciwne kierunki.

Pytania kontrolne:

1. Jak klasyfikujemy tranzystory?
2. Czym różnią się tranzystory bipolarne NPN i PNP?
3. Co to jest polaryzacja normalna tranzystora bipolarnego? Porównaj ją z innymi rodzajami polaryzacji.
4. Narysuj rozpyływ prądów i spadki napięć między poszczególnymi elektrodami tranzystora i omów związki między nimi.
5. Na czym polega ładunkowy opis działania tranzystora?
6. Jakie znasz stany i układy pracy tranzystora bipolarnego?
7. Co ogranicza obszar aktywnej pracy tranzystora?
8. Porównaj charakterystyki tranzystora w układzie OB i OE.
9. Jakie są różnice w schematach zastępczych tranzystora?
10. Co to jest transkonduktancja?
11. W jaki sposób wyznaczamy parametry macierzy h z charakterystyk tranzystora?
12. Co oznacza wielkość U_{CES} ?
13. Jakie częstotliwości graniczne występują w tranzystorze i czy są one powiązane ze sobą?
14. W jaki sposób odbywa się przełączanie tranzystora bipolarnego?
15. Czy występują analogie między przełączaniem diody i tranzystora?
16. Jak klasyfikujemy tranzystory bipolarne?
17. Dlaczego parametry tranzystorów pracujących w różnych układach pracy różnią się?
18. W jaki sposób są oznaczane tranzystory bipolarne?
19. Do jakiego typu zaliczymy tranzystor, którego $V_E = 2 \text{ V}$, $V_B = 2,7 \text{ V}$, $V_C = 6 \text{ V}$ lub $V_E = 5 \text{ V}$, $V_B = 4,3 \text{ V}$, $V_C = 1 \text{ V}$?

20. Oblicz α tranzystora, którego β wynosi:
 a) 50; b) 150; c) 300; d) 600.
21. Jaka jest wartość współczynnika wzmocnienia prądowego tranzystora, jeżeli jego prądy mają następujące wartości:
 a) $I_E = 2 \text{ mA}$, $I_C = 1,98 \text{ mA}$, $I_{CBO} = 20 \text{ }\mu\text{A}$;
 b) $I_E = 1 \text{ mA}$, $I_C = 0,999 \text{ mA}$, $I_{CBO} = 200 \text{ nA}$;
 c) $I_E = 1,5 \text{ mA}$, $I_C = 1,49 \text{ mA}$, $I_{CBO} = 20 \text{ mA}$?
22. Oblicz prądy zerowe tranzystora, wiedząc że $\beta = 200$, $I_E = 2 \text{ mA}$, $I_C = 1,99 \text{ mA}$.
23. Oblicz transkonduktancję i konduktancję wejściową tranzystora w układzie OB i OE, jeżeli:
 a) $I_E = 2 \text{ mA}$; b) $I_E = 1 \text{ mA}$; c) $I_E = 1,5 \text{ mA}$.
 Wartości β przyjmij z zadania 20.
24. Oblicz czasy przełączania tranzystora, jeżeli:
 $E_F = 4 \text{ V}$, $E_R = 1 \text{ V}$, $R_b = 7 \text{ k}\Omega$, $R_c = 5 \text{ k}\Omega$, $U_{CC} = 6 \text{ V}$, $C_{Tc} = 2,5 \text{ pF}$ lub $4,5 \text{ pF}$,
 $C = 12 \text{ pF}$ lub 10 pF , $t_b = 1 \text{ ns}$ lub $1,5 \text{ ns}$, $\tau_s = 80 \text{ ns}$ lub 100 ns , $\beta = 200$ lub 100 .

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Elektronika:

- Polaryzację złącza w kierunku zaporowym i w kierunku przewodzenia (rozdz. 6.3).
- Charakterystykę diody (rozdz. 7).

9. Elektroniczne elementy przełączające

Elementami przełączającymi są: tranzystor jednozłączowy, tyrystor, dynistor, diak, triak (tabl. 9.1).

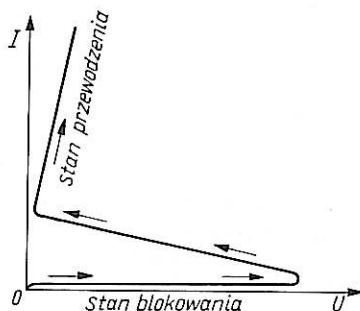
Elementy przełączające mają charakterystykę prądowo-napięciową typu S (rys. 9.1) i pracują w dwóch stanach:

Tablica 9.1

Tyrystory [1]

Liczba końcówek	Rodzaj pracy w III ćwiartce	Liczba warstw półprzewodnikowych	Stosowane nazwy	Symbole graficzne		Charakterystyka
				obowiązujące	spotykane w literaturze	
2	Blokowanie	4	Dynistor		 	
	Przełączanie	5	Diak			
3	Blokowanie	4	Tyrystor		 	
	Przełączanie	5	Triak		 	

1. **Blokowania** (zwany również stanem wyłączenia, który charakteryzuje się bardzo dużą rezystancją elementu).
2. **Przewodzenia** (zwany również stanem włączenia, który charakteryzuje się bardzo małą rezystancją elementu).



Rys. 9.1. Charakterystyka elementu przełączającego [1]

9.1. Tranzystor jednozłączowy

Strukturę, symbol, sposób polaryzacji oraz schemat zastępczy tranzystora jednozłączowego pokazano na rys. 9.2. Tranzystor polaryzuje się w następujący sposób:

- 1) do bazy drugiej doprowadza się wyższy potencjał niż do bazy pierwszej;
- 2) złącze emiter-baza pierwsza polaryzuje się w kierunku przewodzenia.

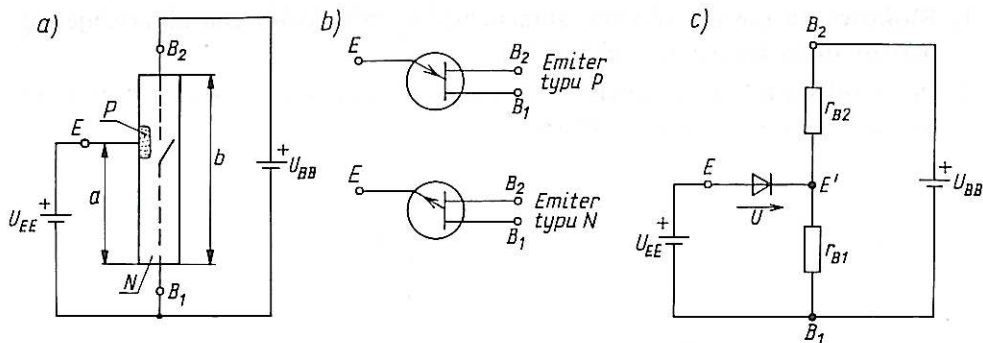
Charakterystyka prądowo-napięciowa tranzystora jednozłączowego jest przedstawiona na rys. 9.3. Jeżeli napięcie między bazami będzie miało wartość zero, to tranzystor będzie się zachowywał jak dioda (krzywa 1). Podczas zwiększania napięcia U_{BB} przez tranzystor płynie coraz większy prąd, w związku z tym potencjał w punkcie E' (rys. 9.2c) również się zwiększa.

$$I_B = U_{BB} / (r_{B1} + r_{B2}),$$

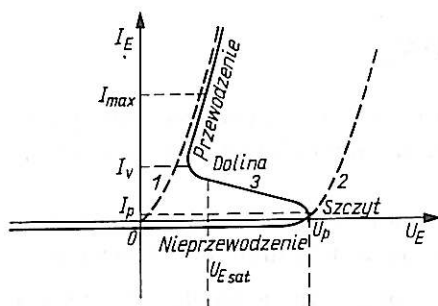
$$U_{E'} = I_B \cdot r_{B1} = \eta U_{BB},$$

przy czym r_{B1} , r_{B2} — rezystancje obszarów półprzewodnika, odpowiadające obszarom między emiterem a bazą pierwszą bądź drugą; η — wewnętrzny współczynnik blokowania (wynosi on ok. 0,6).

Przy napięciu między emiterem a bazą pierwszą mniejszym od wartości $U_{E'} + U$ ($U = 0,5 \div 0,7$ V dla złącza krzemowego), płynie bardzo mały prąd i tranzystor jest w stanie nieprzewodzenia. Po przekroczeniu tego napięcia, złącze emiter-baza pierwsza jest polaryzowane w kierunku przewodzenia i płynie przez nie bardzo duży prąd. Jeżeli rezystancje bazy byłyby stałe, to przy wzroście napięcia zasilania U_{EE} , prąd rósłby zgodnie z krzywą 2. Narastanie prądu emitera powoduje wzrost koncentracji nośników w bazie, a tym samym zmniejszenie rezystancji bazy, co z kolei przyczynia się do zwiększenia spadku napięcia na złączu. Obniżenie potencjału na emiterze wpływa



Rys. 9.2. Tranzystor jednozłączowy: a) polaryzacja; b) symbol graficzny; c) schemat zastępczy [6]
 U_{EE} , U_{BB} — napięcie polaryzujące, r_{B1} , r_{B2} — rezystancja obszaru bazy pierwszej i drugiej, U — napięcie na złączu baza-emiter, b — długość bazy, a — długość bazy, dla której jest określana rezystancja r_{B1} , N , P — obszary półprzewodnika



Rys. 9.3. Charakterystyka tranzystora jednozłączowego [6]

I_{max} — maksymalny prąd emitera, I_V — prąd doliny, I_p — prąd szczytu i odpowiadające mu napięcie U_p , $U_{E\text{sat}}$ — napięcie nasycenia, 1 — charakterystyka diody, 2 — odcinek charakterystyki dla stałej rezystancji bazy, 3 — odcinek charakterystyki przy zmniejszającej się wartości rezystancji bazy i przy wzroście prądu emitera

na zwiększenie płynącego prądu (krzywa 3). Napięcie na emiterze potrzebne do przełączenia tranzystora wynosi od 1 do 3 V.

Najważniejszymi parametrami tranzystora jednozłączowego są:

- wewnętrzny współczynnik blokowania;
- rezystancja międzybazowa ($r_{B1} + r_{B2}$);
- napięcie nasycenia (napięcie emiter-baza pierwsza, przy maksymalnym prądzie emitera);
- prąd doliny;
- prąd szczytu.

Tranzystorów jednozłączowych używa się do budowy przerzutników astabilnych, bistabilnych i monostabilnych.

9.2. Dynistor

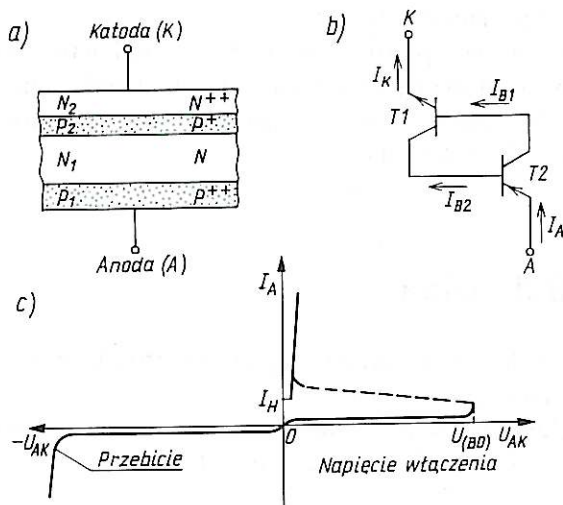
Dynistor jest to element półprzewodnikowy o strukturze czterowarstwowej typu NPNP (rys. 9.4a). Warstwy te są różnej szerokości i mają różne wielkości koncentracji nośników. Obszar P_1 nazywamy anodą, a ob-

szar N_2 — katodą. Taką strukturę można traktować jako połączenie dwóch tranzystorów: typu PNP i NPN (rys. 9.4b). Warstwy P_1 i N_2 będziemy nazywać emiterem, a warstwy N_1 i P_2 — bazami, złącze środkowe zaś — kolektorem.

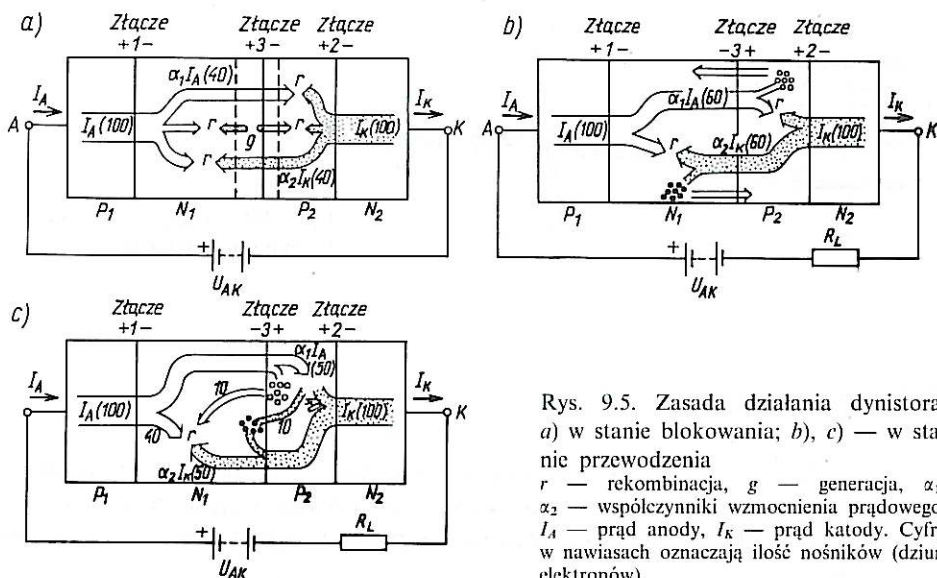
Charakterystykę prądowo-napięciową dynistora przedstawia rys. 9.4c; jest ona taka sama jak charakterystyka złącza PN.

Rozróżnia się trzy stany pracy dynistora:

1. Zaporowy.
2. Blokowania.
3. Przewodzenia.



Rys. 9.4. Dynistor; a) struktura; b) reprezentacja tranzystorowa [6]; c) charakterystyka [1]



Rys. 9.5. Zasada działania dynistora: a) w stanie blokowania; b), c) — w stanie przewodzenia
 r — rekombinacja, g — generacja, α_1 , α_2 — współczynniki wzmocnienia prądowego, I_A — prąd anody, I_K — prąd katody. Cyfry w nawiasach oznaczają ilość nośników (dziur, elektronów)

Dynistor jest w stanie zatkania, jeżeli anoda jest polaryzowana ujemnie względem katody. Złącza N_1P_1 i N_2P_2 są polaryzowane zaporowo, a złącze N_1P_2 — w kierunku przewodzenia. Napięcie polaryzacji odkłada się na złączu N_1P_1 , a prąd płynący przez dynistor jest bardzo mały i równy sumie prądów wstecznych złączy N_1P_1 i N_2P_2 .

Stan blokowania i przewodzenia uzyskuje się przy polaryzacji anody napięciem dodatnim względem katody. Zasadę działania dynistora w stanie blokowania wyjaśniono na rys. 9.5a, a w stanie przewodzenia — na rys. 9.5b, c.

Przelączenie dynistora może nastąpić w wyniku:

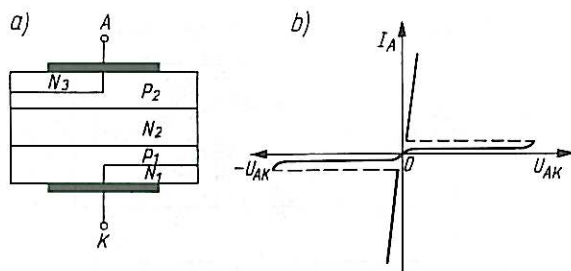
- powielania lawinowego nośników w kolektorze, przy dużym napięciu polaryzującym dynistor;
- wzrostu prądu generacyjnego pod wpływem temperatury;
- gwałtownego wzrostu napięcia między anodą i katodą.

Wyłączenie dynistora następuje przy znacznym obniżeniu napięcia pomiędzy anodą a katodą.

9.3. Diak

Diak jest to dynistor symetryczny, którego struktura i charakterystyka jest przedstawiona na rys. 9.6.

Zasadę działania diaka wyjaśnia się na podstawie dwóch struktur czterowarstwowych ($P_2N_2P_1N_1$ i $P_1N_2P_2N_1$).

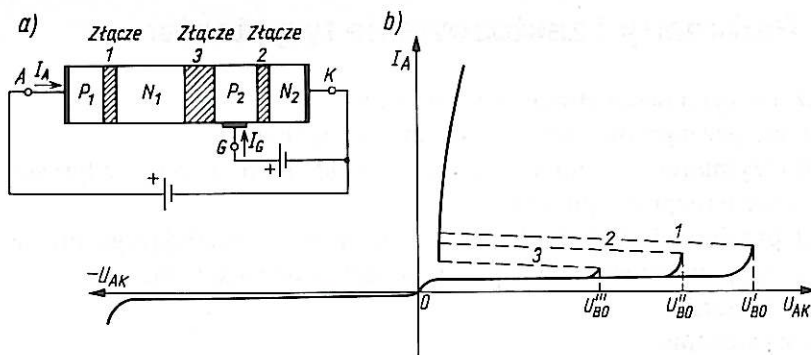


Rys. 9.6. Diak: a) struktura; b) charakterystyka [1]

9.4. Tyrystor

Tyrystor jest to element półprzewodnikowy o strukturze czterowarstwowej typu NPNP, który ma trzecią końcówkę zwaną bramką.

Strukturę oraz charakterystykę prądowo-napięciową tyrystora przedstawiono na rys. 9.7.



Rys. 9.7. Tyrystor: a) polaryzacja; b) charakterystyka [1]

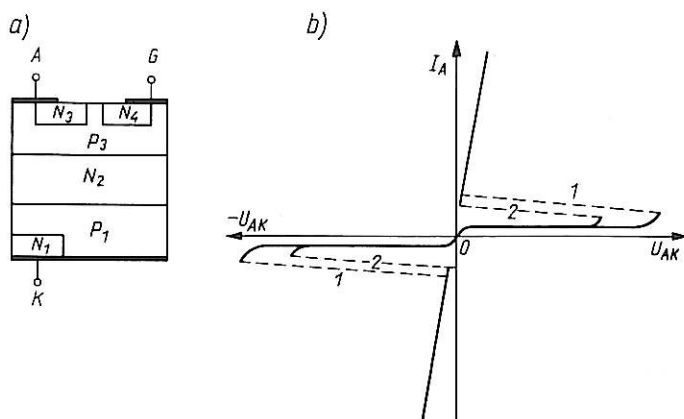
Przełączenie tyrystora może nastąpić w wyniku przepływu prądu przez bramkę. Im jest mniejsze napięcie między anodą a katodą, tym większy musi być prąd bramki, aby nastąpiło przełączenie tyrystora. Można go wyłączyć dopiero wówczas, gdy przez bramkę nie będzie płynął prąd i gdy zmniejszymy napięcie między anodą a katodą.

Źródła zasilające są tak dobrane, aby polaryzować złącze N_2P_2 dwa razy silniej, w wyniku czego złącze to wstrzykuje więcej nośników, powodując dodatnie sprzężenie zwrotne między złączem N_1P_1 i N_2P_2 .

9.5. Triak

Triak jest to tyrystor symetryczny o strukturze i charakterystyce takiej, jak przedstawiono na rys. 9.8.

Przełączanie triaka następuje pod wpływem ujemnego prądu bramki.



Rys. 9.8. Triak: a) struktura; b) charakterystyka[1]

9.6. Parametry i zastosowanie tyrystorów

Najważniejszymi parametrami tyrystorów są:

- **napięcie przełączania**, przy zerowym prądzie bramki;
- **prąd trzymania** — najmniejsza wartość prądu płynącego przez tyrystor, przy której nie następuje jego wyłączenie;
- **prąd przełączający bramki** — wartość prądu powodującego przełączenie tyrystora, przy określonym napięciu między anodą a katodą;
- **czas włączania**;
- **czas wyłączania**.

Tyrystory stosuje się w:

- układach zasilania — jako regulatory mocy;
- automatyce — jako styczniki;
- innych układach elektrycznych — jako przerywacze prądu stałego, sterowniki prądu przemiennego.

Pytania kontrolne:

1. Czym charakteryzują się elementy przełączające?
2. Porównaj tranzystor jednozłączowy z tranzystorem bipolarnym.
3. Czym różni się dynistor od dioda, a czym od tyrystora?
4. Jaka jest zasada działania tyrystora?
5. Narysuj i omów przebieg charakterystyki prądowo–napięciowej tyrystora.
6. Wymień parametry tyrystora.
7. Gdzie stosuje się tyrystory?

PRZYPOMNIJ SOBIE!

Elektronika:

- Co to jest półprzewodnik unipolarny (rozdz. 4.4).
- Co dzieje się z nośnikiem prądu w półprzewodniku (rozdz. 4.4).

10. Tranzystory polowe (unipolarne — FET)

Tranzystory polowe w skrócie zwane FET (ang. *Field Effect Transistor*), są również nazywane unipolarnymi. **Tranzystory te mają kanał typu N lub P, który może być wzbogacany lub zubożony.**

W tranzystorach unipolarnych elektrody mają następujące nazwy i oznaczenia:

S — źródło (ang. *Source*),

G — bramka (ang. *Gate*),

D — dren (ang. *Drain*).

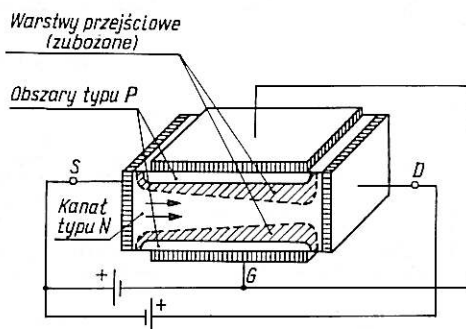
W tranzystorach polowych w przepływie prądu biorą udział nośniki większościowe jednego rodzaju — dziury lub elektrony (stąd nazwa unipolarne). W tranzystorach z kanałem typu N nośnikami prądu są elektrony, a z kanałem typu P — dziury. Wartość prądu przepływającego przez tranzystor polowy, zależy od wartości napięcia przyłożonego między źródłem a drenem oraz od wartości rezystancji kanału, która wyraża się wzorem

$$R = \frac{1}{quN} \frac{l}{hw},$$

w którym: μ , N — ruchliwość i koncentracja nośników w kanale; l , h , w — wymiary kanału.

Tranzystory polowe dzielimy na:

- **złączowe** (ze złączem PN) — rys. 10.1;
- **z izolowaną bramką** — rys. 10.6.



Rys. 10.1. Konstrukcja tranzystora złączowego [1]

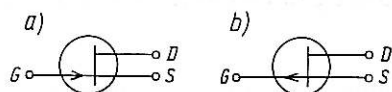
S — źródło, G — bramka, D — dren

10.1. Tranzystory polowe złączowe (JFET)

10.1.1. Zasada działania

Tranzystory polowe złączowe, których symbole przedstawiono na rys. 10.2, należy polaryzować tak, aby:

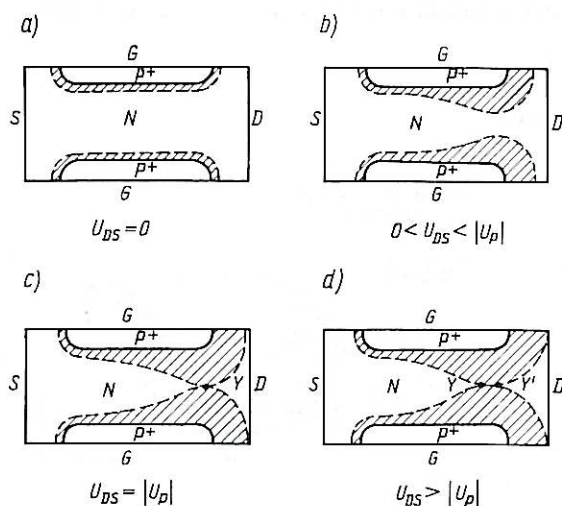
- nośniki poruszały się od źródła do drenu,
- złącze bramka-kanal było polaryzowane zaporowo.



Rys. 10.2. Symbole graficzne tranzystorów złączowych: a) z kanałem typu N; b) z kanałem typu P [1]

Zasadę działania tranzystora JFET (ang. *Junction Field Effect Transistor*) ilustruje rys. 10.3. Jeżeli napięcie $U_{GS}=0$ i U_{DS} ma małą wartość (rys. 10.3a), to prąd zmienia się liniowo w funkcji przykładowego napięcia (tranzystor zachowuje się jak rezystor). Podczas narastania napięcia U_{DS} złącze kanał-bramka (PN) jest coraz silniej polaryzowane zaporowo,

przy czym polaryzacja ta jest silniejsza w pobliżu drenu (rys. 10.3b). Przy pewnej wartości napięcia $U_{DS}=U_{DSsat}=U_p$, następuje **zamknięcie (odcięcie) kanału** (rys. 10.3c) przy drenie. Dalszy wzrost napięcia powoduje, że kanał jest zamykany coraz bliżej źródła (punkt Y-Y'). Przyrost napięcia rozkłada się na warstwie zaporowej, nie powodując dalszego wzrostu prądu. Tranzystor wchodzi w stan nasycenia, a prąd przez niego płynący jest **prądem nasycenia**. Ze wzrostem napięcia U_{GS} : • maleje wartość płynącego przez tranzystor prądu; • przy mniejszych wartościach napięcia U_{DS} następuje zamknięcie kanału, czemu odpowiada mniejsza wartość prądu nasycenia (patrz rys. 10.4b).



Rys. 10.3. Zasada działania tranzystora złączowego: a) brak polaryzacji; b) rozszerzenie się warstwy zaporowej w wyniku przyłożonego napięcia U_{DS} ; c) odcięcie kanału (Y); d) nasycenie tranzystora [6]

$U_p = U_{GSoff}$ — napięcie odcięcia kanału

10.1.2. Charakterystyki i parametry

Z powyższych rozważań wynika, że przewodzący tranzystor polowy złączowy ma dwa **zakresy pracy: liniowy i nasycenia**.

W zakresie liniowym, przy równomiernym rozkładzie domieszek w kanale prąd drenu

$$I_D = G_0 (1 - \sqrt{U_{GS}/U_P}) U_{DS} ;$$

przy szpilkowym rozkładzie domieszek w kanale

$$I_D = \beta [(U_{GS} - U_P) U_{DS} - U_{DS}^2 / 2] ;$$

$$\beta = G_0 / U_P.$$

W zakresie nasycenia, przy równomiernym rozkładzie domieszek w kanale, prąd nasycenia drenu

$$I_{Dsat}/I_{DO} = 1 - 2U_{GS}/U_P + 2(U_{GS}/U_P)^{3/2} ;$$

$$I_{DO} = -G_0 U_P / 3 ;$$

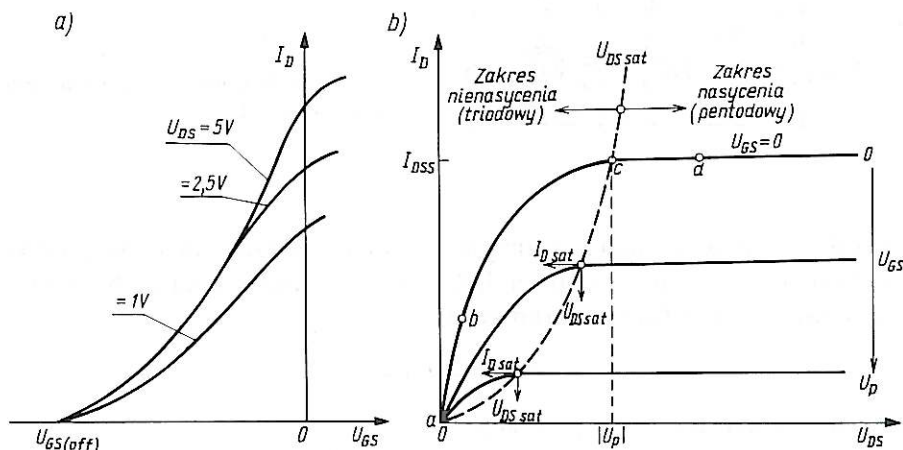
przy szpilkowym rozkładzie domieszek w kanale

$$I_{Dsat} = \beta (U_{GS} - U_P)^2 / 2 .$$

W praktyce najczęściej występuje szpilkowy rozkład domieszek.

Charakterystyki tranzystora złączowego są następujące:

- 1) **przejściowa** — zależność prądu drenu (I_D) od napięcia bramka-źródło (U_{GS}), przy stałym napięciu dren-źródło (U_{DS}) — rys. 10.4a;
- 2) **wyjściowa** — zależność prądu drenu (I_D) od napięcia dren-źródło (U_{DS}), przy stałym napięciu bramka-źródło (U_{GS}) — rys. 10.4b.



Rys. 10.4. Charakterystyki tranzystora złączowego: a) przejściowa [1]; b) wyjściowa [6]
a — odpowiada stanowi z rys. 10.3a, b — odpowiada stanowi z rys. 10.3b, c — odpowiada stanowi z rys. 10.3c, d — odpowiada stanowi z rys. 10.3d

Do parametrów tranzystora złączowego zaliczamy:

- **rezystancję kanału** — jej wartość jest bardzo duża ($k\Omega$);
- **prąd nasycenia drenu** — przy określonym napięciu dren-źródło jest on w granicach od 2 do 25 mA;
- **napięcie bramka-źródło** — wynosi ono od 0 do $-7,5$ V.

Przykładowe oznaczenia tranzystorów złączowych produkcji polskiej są następujące: BF245, BFR30 i BFR31.

10.1.3. Schemat zastępczy

Dla tranzystora złączowego, tak jak i dla tranzystora bipolarnego, można utworzyć schemat zastępczy (model), który przedstawiono na rys. 10.5.

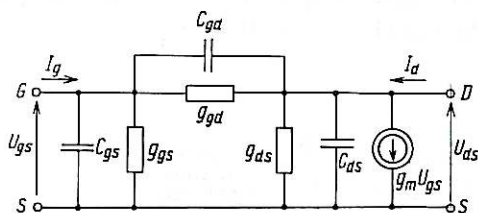
W modelu tym, C_{gs} i C_{gd} są to pojemności warstwy zaporowej, g_{gs} i g_{gd} — konduktancje bramka-źródło i bramka-dren, g_m — transkonduktancja, a g_{ds} — konduktancja wyjściowa. Są one określone zależnościami:

$$g_m = \beta U_{DS} \quad \text{transkonduktancja dla zakresu nienasycenia};$$

$$g_m = \beta(U_{GS} - U_P) \quad \text{transkonduktancja dla zakresu nasycenia};$$

$$g_{ds} = \beta(U_{GS} - U_P - U_{DS}) \quad \text{konduktancja wyjściowa dla zakresu nienasycenia};$$

$$g_{ds} = 0 \quad \text{konduktancja wyjściowa dla zakresu nasycenia}.$$



Rys. 10.5. Schemat zastępczy tranzystora złączowego [1]

Częstotliwość maksymalna w tranzystorze zależy od czasu przelotu nośników przez kanał i od stałej czasowej ładowania pojemności kanał-bramka C_g , i jest równa **częstotliwości granicznej**

$$f_T = 1 / 2\pi r_d C_g .$$

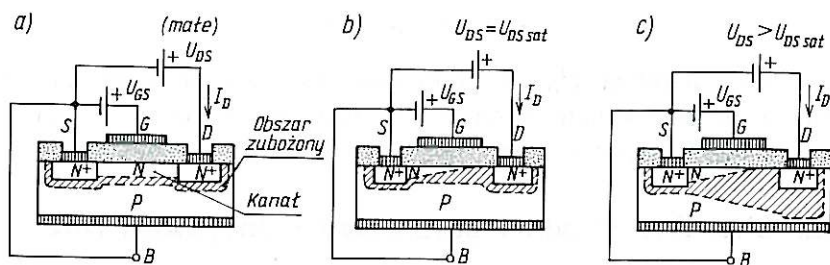
Maksymalna częstotliwość generacji

$$f_{\max} = f_T \sqrt{r_d g_m} ,$$

przy czym r_d oznacza rezystancję kanału.

10.2. Tranzystory polowe z izolowaną bramką (IGFET)

Tranzystor z izolowaną bramką (rys. 10.6) jest to najczęściej tranzystor o konstrukcji MIS (ang. *Metal Insulator Semiconductor*) z kanałem typu N lub P, izolowanym od bramki warstwą dielektryka.



Rys. 10.6. Zasada działania tranzystora z izolowaną bramką: a) zakres liniowy; b) odcięcie kanału; c) nasycenie tranzystora [1]
B — podłoże

W zależności od zjawisk fizycznych i od polaryzacji bramki, w tranzystorze tym może powstać:

- **kanal indukowany**, tzn. kanał w postaci warstwy inwersyjnej (np. kanał typu N ma bardzo dużo elektronów, a mało dziur);
- **kanal wbudowany**, tzn. kanał w postaci warstwy akumulacyjnej wzbogacanej (np. kanał typu N ma dużo dziur i bardzo dużo elektronów) lub zubożanej (np. kanał typu N ma mało elektronów i mało dziur), które są inaczej określane jako warstwy domieszkowane o przeciwnym typie przewodnictwa w stosunku do podłoża.

10.2.1. Zasada działania tranzystora MIS

Zasadę działania tranzystora MIS omówimy na przykładzie najczęściej spotykanej polaryzacji, tj. przy zwartym źródle i podłożu. Jeżeli do bramki zostanie przyłożone napięcie dodatnie, to powstanie kanał wzbogacany, a jeśli ujemne — to kanał zubożony. W tranzystorze z kanałem wzbogacanym, wzrost napięcia U_{GS} powyżej wartości napięcia progowego U_T powoduje powstanie kanału. **Napięcie progowe U_T jest to napięcie, jakie należy przyłożyć do bramki, aby powstała warstwa inwersyjna.** Każdy następny przyrost napięcia U_{GS} powoduje przyrost ładunku wprowadzanego przez bramkę, który jest kompensowany ładunkiem nośników powstającego kanału. W tranzystorze z kanałem zubożonym, wzrost napięcia U_{GS} powoduje silniejsze zubożenie kanału, aż wreszcie przy pewnej jego wartości, równej tzw. **napięciu odcięcia U_{GSoff}** , kanał zanika.

Jeżeli napięcia U_{DS} i U_{GS} będą porównywalne, to prąd drenu będzie zależny liniowo od napięcia U_{DS} — kanał pełni wówczas funkcję rezystora liniowego (rys. 10.6a). Dalszy wzrost napięcia U_{DS} powoduje, tak jak w tranzystorze złączowym, spadek napięcia na rezystancji kanału (modulacja rezystancji kanału). W okolicy drenu następuje zmniejszanie inwersji, aż do całkowitego jej zaniku. Mówimy wtedy o odcięciu kanału. Wartość napięcia U_{DS} , przy której następuje odcięcie kanału nazywamy **napięciem nasycenia** (rys. 10.6b).

$$U_{DSsat} = U_{GS} - U_T.$$

Dalszy wzrost napięcia U_{DS} nie powoduje już wzrostu prądu drenu, ale wpływa na odcięcie kanału bliżej źródła. Mówimy wówczas, że tranzystor pracuje w stanie nasycenia (rys. 10.6c).

10.2.2. Charakterystyki i parametry tranzystora MIS

Podstawowymi charakterystykami tego tranzystora są:

- **charakterystyka przejściowa** — zależność prądu drenu od napięcia bramka-źródło, przy stałym napięciu źródło-dren;
- **charakterystyka wyjściowa** — zależność prądu drenu od napięcia źródło-dren, przy stałym napięciu bramka-źródło.

Rodziny charakterystyk oraz symbole różnych rodzajów tranzystorów MIS przedstawiono w tabl. 10.1.

W zakresie liniowym prąd drenu

$$I_D = \beta[(U_G - U_T)(U_D - U_S) - (U_D^2 - U_S^2)/2].$$

Jeżeli źródło zostanie uziemione, to

$$I_D = \beta[(U_{GS} - U_T)U_{DS} - U_{DS}^2/2].$$

W zakresie nasycenia prąd drenu

$$I_D = \beta(U_{GS} - U_T)^2/2.$$

Parametrami tranzystora MIS są:

- **napięcie progowe** — U_T ;
- **napięcie odcięcia** — U_{GSoff} ;
- **prąd nasycenia**, przy zwartym źródle i bramce,

$$I_{Dsat} = \beta(U_{GS} - U_T)^2/2;$$

- rezystancje kanału, przy maksymalnym prądzie drenu;
- rezystancje kanału, przy wyłączonym kanale.

Schemat zastępczy tranzystora MIS przedstawiono na rys. 10.7.

Rodzaje tranzystorów z izolowaną bramką [6]

Rodzaj tranzystora MIS	Symbol graficzny	Charakterystyka przejściowa	Charakterystyka wyjściowa
Kanał zubożany typu N			
Kanał wzbogacający typu N			
Kanał zubożany typu P			
Kanał wzbogacający typu P			

Transkonduktancja tranzystora MIS w zakresie liniowym

$$g_m = \beta U_{DS};$$

w zakresie nasycenia

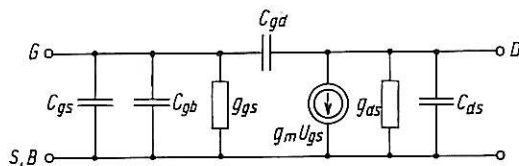
$$g_m = \beta (U_{GS} - U_T).$$

Częstotliwości graniczne tranzystora MIS wyznacza się podobnie, jak tranzystora złączeniowego — przy czym

$$f_T = g_m / 2\pi C_{gs}.$$

Rys. 10.7. Schemat zastępczy tranzystora z izolowaną bramką [1]

g_{ds} — konduktancja wyjściowa, g_m — transkonduktancja, g_{gs} — konduktancja wejściowa, C_{gs} — pojemność źródło-bramka, C_{gb} — pojemność bramka-podłoże, C_{gd} — pojemność dren-bramka, C_{ds} — pojemność dren-źródło



Tranzystory polowe mogą pracować w trzech podstawowych konfiguracjach:

1. **Układ o wspólnym źródle — OS** (odpowiednik układu OE tranzystora unipolarnego).
2. **Układ o wspólnej bramce — OG** (odpowiednik układu OB).
3. **Układ o wspólnym drenie — OD** (odpowiednik układu OC).

Pytania kontrolne:

1. Porównaj strukturę i działanie tranzystora unipolarnego i bipolarnego.
2. Jaka jest różnica między zasadą działania tranzystora złączowego i tranzystora z izolowaną bramką?
3. Jakie parametry ma tranzystor złączowy, a jakie tranzystor z izolowaną bramką?
4. Jakie są częstotliwości graniczne w tranzystorach polowych?
5. Co oznacza pojęcie „odcięcie kanału”?
6. Jaka jest różnica między napięciem progowym a napięciem odcięcia?

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Fizyka:

- Pojęcie energii kwantu promieniowania elektromagnetycznego.
- Pojęcie długości fali elektromagnetycznej.
- Związek między długością a częstotliwością fali elektromagnetycznej.
- Zakres długości fal promieniowania widzialnego.
- Zagadnienie kwantowego charakteru światła.

Elektronika:

- Zasadę pracy światłowodu (rozdz. 2.3).
- Zachowanie się nośnika w półprzewodniku (rozdz. 4.4).
- Polaryzację złącza w kierunku zaporowym i w kierunku przewodzenia (rozdz. 6.3).

11. Elementy i podzespoły optoelektroniczne

11.1. Dioda elektroluminescencyjna

11.1.1. Zasada działania

Dioda elektroluminescencyjna (rys. 11.1) jest źródłem promieniowania widzialnego (dioda LED, zwana również świecą), jak i niewidzialnego — promieniowanie podczerwone (dioda IR).

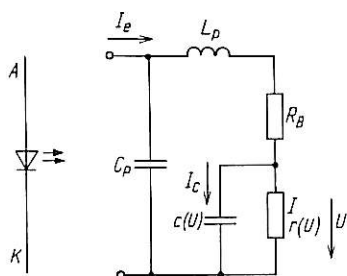
Dioda pracuje prawidłowo przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia.

Zasada działania diod elektroluminescencyjnych jest oparta na zjawisku elektroluminescencji, które polega na zamianie energii nośników ładunku (elektronów) na energię promienistą (jest to rekombinacja) i wyemitowaniu kwantu promieniowania w postaci fotonu.

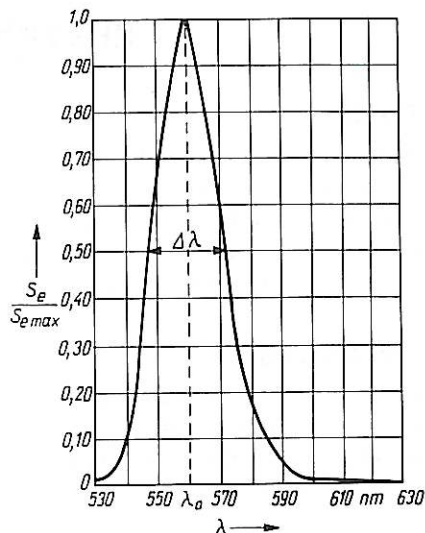
Długość fali generowanego (emitowanego) promieniowania

$$\lambda = \frac{ch}{W_g},$$

przy czym: $W_g = W_c - W_v$ — szerokość pasma zabronionego (od 1,35 eV do 2,25 eV) lub różnica energii poziomów, między którymi zachodzi rekombinacja, c — prędkość światła, h — stała Plancka.



Rys. 11.1. Symbol diody elektroluminescencyjnej i jej schemat zastępczy [11]
 A — anoda, K — katoda



Rys. 11.2. Charakterystyka widmowa promieniowania diody elektroluminescencyjnej [11]
 $\Delta\lambda$ — szerokość połowkowa, λ_0 — długość fali dla maksimum promieniowania, S_e — strumień energetyczny, $S_{e\max}$ — strumień energetyczny dla λ_0

Długość fali emitowanego promieniowania zwiększa się ze wzrostem temperatury złącza. Diody emitują promieniowanie w bardzo wąskim przedziale widma: od 490 nm — kolor niebieski, do 950 nm — bliska podczerwień (rys. 11.2).

Diody elektroluminescencyjne są wytwarzane z materiałów półprzewodnikowych (pierwiotki z III i V grupy układu okresowej, takich jak: GaAs, GaP i GaAsP, o odpowiednim domieszkowaniu), charakteryzujących się dużą sprawnością emisji promieniowania. Diody emitują promieniowanie o barwach: niebieskiej, żółtej, zielonej, pomarańczowej, czerwonej. Produkuje się również diody świecące kilkoma kolorami.

11.1.2. Właściwości optyczne i elektryczne

Parametrami optycznymi diody elektroluminescencyjnej są:

- **strumień energetyczny** — S_e (moc emitowana przez diodę IR), wyrażany w watach, lub **strumień świetlny** (moc emitowana przez diodę świecącą), wyrażany w lumenach. Wartość mocy emitowanej przez diodę rośnie ze wzrostem prądu przewodzenia, a maleje ze wzrostem temperatury złącza;
- **natężenie promieniowania** — J_e (stosunek strumienia energetycznego do kąta bryłowego — dla diod IR), którego jednostką jest wat na steradian;
- **światłość** (stosunek strumienia świetlnego do kąta bryłowego — dla diod LED), wyrażana w kandelach. Natężenie promieniowania i światłość zwiększają się ze wzrostem prądu przewodzenia;

- **połówkowa szerokość spektralna promieniowania** — $\Delta\lambda$ (szerokość pasma promieniowania, definiowana jako różnica długości fal $\lambda_2 - \lambda_1$, dla których moc emitowana osiąga połowę swej wartości maksymalnej).

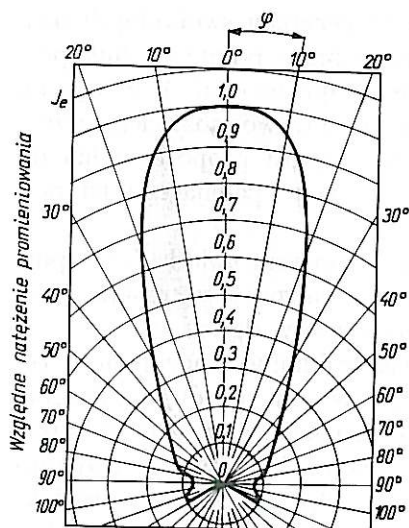
Parametry optyczne diod elektroluminescencyjnych określa się również na podstawie:

- 1) **charakterystyki widmowej** (zależność mocy emitowanej — strumienia energetycznego lub strumienia świetlnego — od długości fali emitowanego promieniowania) — rys. 11.2;
- 2) **charakterystyki kątowej promieniowania** diody (zależność mocy emitowanej od wartości kąta mierzonego od osi diody) — rys. 11.3.

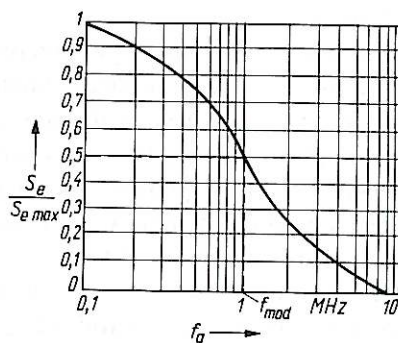
Diody elektroluminescencyjne mają takie same parametry elektryczne jak inne diody, tj. prąd przewodzenia (może być ciągły lub impulsowy), napięcie przewodzenia, napięcie wsteczne oraz moc strat, która wynosi od kilkadziesiąt do kilkuset mW, a jej wartość zależy od temperatury złącza.

Bardzo ważnym parametrem diody jest **sprawność kwantowa zewnętrzna** (stosunek liczby fotonów wyemitowanych przez diodę do liczby nośników przepływających przez złącze), która maleje ze wzrostem temperatury złącza. Trwałość diod wynosi około 10^5 godzin.

Właściwości dynamiczne diod określa przebieg charakterystyki częstotliwościowej, na której jest zaznaczona częstotliwość graniczna. Jest to częstotliwość, przy której moc promieniowania maleje do połowy swojej wartości maksymalnej (rys. 11.4) i zależy od materiału półprzewodnikowego, domieszkowania (czasu życia nośników) oraz technologii wytwarzania.]



Rys. 11.3. Charakterystyka kątowa diody elektroluminescencyjnej [11]
 φ — kąt, pod jakim dioda emituje promieniowanie



Rys. 11.4. Charakterystyka częstotliwościowa diody elektroluminescencyjnej [11]
 f_g — częstotliwość graniczna

Zaletami diod elektroluminescencyjnych są:

- mały pobór prądu,
- mała wartość napięcia zasilającego,
- duża sprawność,
- mała moc strat,
- małe rozmiary,
- duża trwałość,
- duża wartość luminacji.

W zależności od zakresu emitowanego promieniowania, diody elektroluminescencyjne można stosować jako: wskaźniki optyczne, wskaźniki stanów logicznych, np. w kalkulatorach i zegarkach (diody świecące), oraz jako źródła promieniowania podczerwonego (diody IR).

11.2. Fotodetektory

Fotodetektory (zwane również odbiornikami fotoelektrycznymi), ze względu na rodzaj wykorzystywanego zjawiska fotoelektrycznego, dzielimy na dwie grupy:

1. **Fotodetektory wykorzystujące zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne** — należą do nich **fotokatody**, które są wykonywane z metali alkalicznych.
2. **Fotodetektory wykorzystujące wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne** — należą do nich: **fotorezystory**, **fotodiody**, **fotoogniwa**, **fototranzystory**, **fototyristory**.

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne polega na generacji swobodnych nośników ładunku pod wpływem zaabsorbowanego przez półprzewodnik promieniowania elektromagnetycznego (oświetlenie półprzewodnika). W wyniku zaabsorbowanego promieniowania zmienia się jego przewodność elektryczna. Liczba wygenerowanych nośników ładunku jest wprost proporcjonalna do liczby fotonów promieniowania elektromagnetycznego padającego na półprzewodnik.

Fotoprzewodnictwo, czyli przepływ prądu pod wpływem światła, występuje przy promieniowaniu elektromagnetycznym mieszczącym się w wąskim przedziale widma, a jego natężenie zależy od temperatury złącza.

Fotoodbiorniki możemy sprzęgać z diodami elektroluminescencyjnymi, w celu przesyłania sygnałów na drodze optycznej. W ten sposób uzyskujemy przekazywanie sygnałów z jednego układu do drugiego, przy galwanicznym odseparowaniu tych układów. Tak powstały przyrząd nazywamy **transoptorem** (dioda i fotodetektor w różnych obudowach) lub **łączem optoelektronicznym** (dioda i fotodetektor w jednej obudowie). Transoptor może być zamknięty (transmisja promieniowania między diodą i fotodetektorem następuje za pomocą światłowodu) lub otwarty (transmisja promieniowania między diodą i fotodetektorem następuje w powietrzu).

Elementy tego typu znajdują zastosowanie m.in. w: układach automatyki i zdalnego sterowania, układach telekomunikacyjnych, urządzeniach alarmowych, sygnalizacyjnych i kontrolno-pomiarowych.

11.2.1. Fotorezystor

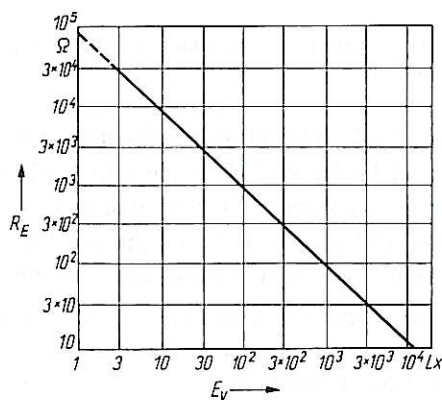
Fotorezystorem nazywamy element półprzewodnikowy, w którym pod wpływem oświetlenia następuje zmiana jego przewodności, niezależnie od kierunku przyłożonego napięcia zewnętrznego.

Fotorezystory są wykonywane z materiałów półprzewodnikowych, takich jak: CdS, CdSe, CdTe, PbS, PbSe i PbTe. Materiały te mogą być domieszkowane.

Oświetlenie fotorezystora powoduje zwiększenie przepływającego prądu (zmniejsza się jego rezystancja). Prąd będący różnicą całkowitego prądu płynącego przez fotorezystor i **prądu ciemnego** (prąd płynący przez fotorezystor przy braku oświetlenia) nazywamy **prądem fotoelektrycznym**. Jego wartość zależy od natężenia oświetlenia i jest określona zależnością

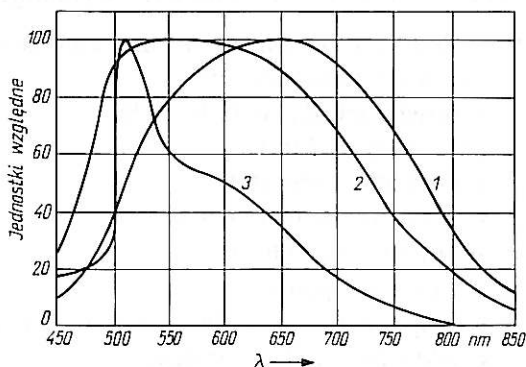
$$I_p = G \cdot E_v^\gamma,$$

w której: G , γ — wartości stałe zależne od materiału półprzewodnikowego i rodzaju domieszek, E_v — natężenie oświetlenia.



Rys. 11.5. Zależność rezystancji fotorezystora od natężenia oświetlenia [11]

Podstawowym parametrem fotorezystora jest **czułość widmowa** (zależność rezystancji od natężenia oświetlenia — rys. 11.5). Na wartość czułości wpływa rodzaj materiału i sposób domieszkowania — dobierane ze względu na przeznaczenie fotorezystora (rys. 11.6).



Rys. 11.6. Charakterystyka czułości widmowej fotorezystora przeznaczonego do: [11]

1 — pracy w zakresie czerwonym widma promieniowania, 2 — pomiarów świetlnych, 3 — wykrywania płomieni

Rezystancja fotorezystora zależy również od jego wymiarów i dana jest wzorem

$$R_E = \rho \frac{d}{l},$$

w którym: d — odstęp między elektrodami, l — szerokość elektrod, ρ — rezystywność półprzewodnika.

Innym parametrem charakteryzującym właściwości fotorezystora jest **współczynnik n** , określany jako stosunek rezystancji ciemnej do rezystancji przy danej wartości natężenia oświetlenia (np. 50 lx).

$$n = \frac{R_D}{R_{50}},$$

przy czym: R_D — rezystancja ciemna, R_{50} — rezystancja przy natężeniu oświetlenia równym 50 lx.

Wartość **rezystancji ciemnej** zależy od stopnia czystości półprzewodnika i od liczby defektów sieci krystalicznej. Rezystancja ciemna jest około tysiąc razy większa od rezystancji przy oświetleniu 50 lx i zawiera się w przedziale od $10^6 \Omega$ do $10^{12} \Omega$ (dla porównania rezystancja przy oświetleniu słonecznym jest rzędu kilkunastu lub kilkudziesięciu Ω).

Na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej fotorezystora dobiera się właściwy obszar jego pracy. Charakterystyki te są liniowe w dużym zakresie napięć i prądów.

Moc wydzielana w fotorezystorze zależy od powierzchni światłoczułej i sposobu odprowadzania ciepła.

11.2.2. Fotodiody i fotoogniwo

Zasada działania fotoogniwa i fotodiody półprzewodnikowej jest oparta na zjawisku fotoelektrycznym wewnętrznym, a ich nazwy wiążą się z różnymi rodzajami pracy złącza PN (patrz charakterystyka prądowo-napięciowa — rys. 11.7). Fotodiody wykonuje się głównie z *krzemu*.

Fotodiody i fotoogniwa są charakteryzowane przez:

a) parametr technologiczny:

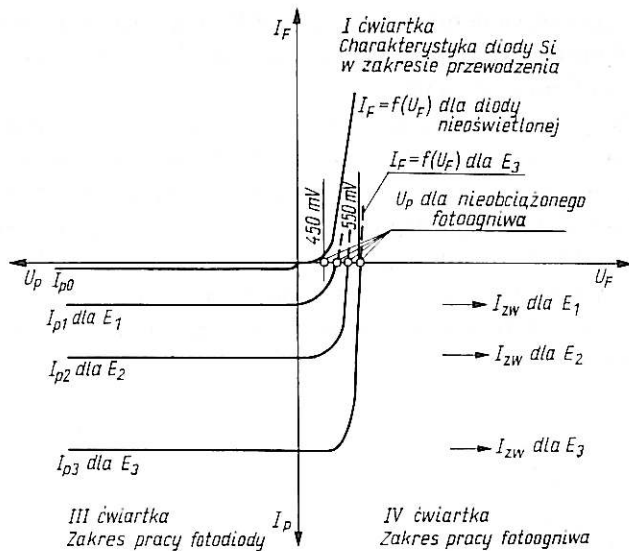
- powierzchnia światłoczuła;

b) parametry elektryczne:

- napięcie wsteczne,
- rezystancja termiczna,
- pojemność złącza;

c) parametry optyczne:

- długość fali promieniowania, dla której czułość jest maksymalna,
- widmowy zakres pracy λ_1, λ_2 .



Rys. 11.7. Obszary pracy fotodiody i fotoogniwa [11]
 I_p — prąd fotoprzewodnictwa, I_{zw} — prąd zwarcia

Fotodiodę polaryzuje się zaporowo zewnętrznym źródłem napięcia. Pod wpływem oświetlenia przez fotodiodę płynie prąd wsteczny, który zwiększa się ze wzrostem oświetlenia.

W **fotooogniwie**, pod wpływem oświetlenia wytwarza się siła elektromotoryczna polaryzująca złącze w kierunku przewodzenia, a kierunek płynącego prądu jest przeciwny do kierunku przewodzenia diody.

Dla fotoogniwa określa się tzw. **prąd zwarcia**, którego natężenie jest proporcjonalne do mocy promieniowania padającego na powierzchnię światłoczułą. Jeżeli fotodioda i fotoogniwo są tym samym elementem, to wartość prądu zwarcia fotoogniwa jest równa w przybliżeniu wartości prądu fotoelektrycznego fotodiody.

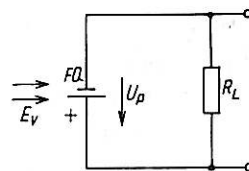
11.2.2.1. Właściwości fotoogniwa

Schemat włączenia fotoogniwa do obwodu przedstawiono na rys. 11.8.

Podstawowymi parametrami fotoogniwa są:

- fotoelektryczna siła elektromotoryczna — U_p ;
- prąd zwarcia fotoogniwa — I_{zw} ;
- sprawność energetyczna — η .

Wartość siły elektromotorycznej zależy od rodzaju materiału półprzewodnikowego i jego domieszkowania, oraz od natężenia oświetlenia. Przy wzroście natężenia oświetlenia (przy bardzo małych wartościach natężenia) siła elektromotoryczna początkowo rośnie liniowo, potem zaczyna narastać logarytmicznie, by wreszcie (przy znacznych wartościach natę-

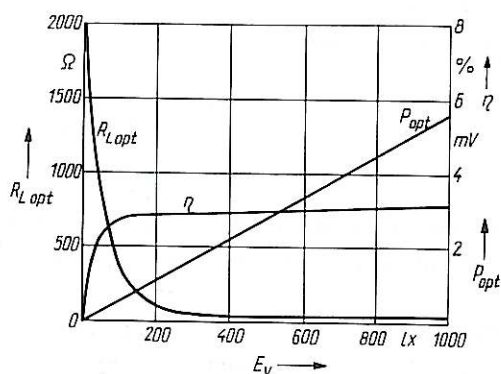


Rys. 11.8. Sposób włączenia fotoogniwa [11]
 R_L — rezystancja obciążenia,
 E_v — natężenie oświetlenia,
 U_p — siła elektromotoryczna

zenia oświetlenia — około 800 lx) osiągnąć wartość nasycenia równą 450 mV. Natomiast prąd zwarcia fotoogniwa zmienia się proporcjonalnie do zmian natężenia oświetlenia.

Sprawność energetyczna fotoogniwa (zdolność przetwarzania energii promieniowania na energię elektryczną) zwiększa się wraz ze wzrostem natężenia oświetlenia i wynosi od kilku do kilkunastu procent.

Ważnym zagadnieniem dla prawidłowej pracy fotoogniwa jest określenie wartości rezystancji obciążenia (rezystancja dopasowania). Wartość rezystancji dobiera się na podstawie wykresu lub katalogu tak, aby przy danej wartości natężenia oświetlenia uzyskać maksymalną moc fotoogniwa (rys. 11.9).



Rys. 11.9. Zależność parametrów fotoogniwa od natężenia oświetlenia [11]
 $R_{L opt}$ — optymalna rezystancja obciążenia,
 P_{opt} — moc maksymalna, η — sprawność energetyczna

Parametrami optycznymi fotoogniwa są:

- **zakres długości fal promieniowania**, przy których względna wartość czułości wynosi 50% swej maksymalnej wartości ($\lambda_2 - \lambda_1$ jest rzędu 50 nm);
- **długość fali promieniowania**, przy której występuje maksimum czułości (można ją przesunąć w stronę fal krótszych lub dłuższych, stosując odpowiednie technologie).

Charakterystyka czułości widmowej fotoogniwa — $S(\lambda)$ jest analogiczna do charakterystyki widmowej promieniowania diody elektroluminescencyjnej; jej kształt zależy od kąta padania promieniowania na powierzchnię światłoczułą.

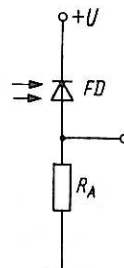
Fotoogniwa są stosowane jako źródła zasilające układy elektroniczne pracujące w trudno dostępnych miejscach lub jako czujniki w układach automatyki. Fotoogniwa można łączyć szeregowo, równolegle lub szeregowo-równolegle, w zależności od żądanej wartości siły elektromotorycznej i prądu obciążenia (można otrzymać fotoogniwo o mocy kilku watów).

11.2.2.2. Właściwości fotodiody

Na rysunku 11.10 pokazano sposób włączenia fotodiody do obwodu elektrycznego. Pracuje ona przy polaryzacji zaporowej. Przy braku oświetlenia, przez fotodiodę płynie **prąd ciemny** I_0 wywołany generacją termiczną nośników. Prąd ten narasta liniowo wraz ze wzrostem wartości napięcia wstecznego.

Prąd fotoelektryczny płynący przez fotodiodę jest proporcjonalny do mocy promieniowania padającego na jej powierzchnię, nie zależy natomiast od napięcia wstecznej polaryzacji i wartości obciążenia.

Fotodiodę można traktować jako źródło prądu o wydajności zależnej od natężenia oświetlenia.

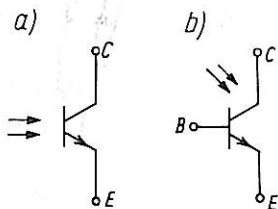


Rys. 11.10. Sposób włączenia fotodiody [11]

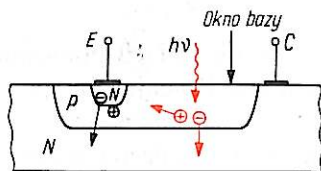
11.2.3. Fototranzystor

Fototranzystor jest to element półprzewodnikowy z dwoma złączami PN, który działa tak samo jak konwencjonalny tranzystor, przy czym jego prąd kolektora nie zależy od prądu bazy, lecz od natężenia promieniowania oświetlającego obszar bazy. Fototranzystory wykonuje się głównie z *krzemu*. Na rysunku 11.11 przedstawiono symbole graficzne fototranzystora, a na rys. 11.12 pokazano zasadę działania fototranzystora planarnego.

Oświetlenie fototranzystora powoduje wygenerowanie par elektron-dziura w warstwie typu P. Elektrony jako ujemne nośniki ładunku dyfundują w kierunku prawego złącza (kolektorowego) i przechodzą przez warstwę zaporową do prawego obszaru typu N (pod wpływem pola elektrycznego). Dziury nie mogą przejść do obwodu emiterowego z powodu istniejącej bariery potencjału na złączu baza-emiter. Niemniej jednak część z nich ma dostatecznie dużą energię kinetyczną, aby przedostać się przez lewą barierę do obszaru typu N (emiter), gdzie ulegają rekombinacji. Te, które nie przeszły — powiększają nieskompensowany ładunek dodatni, obniżając barierę energetyczną złącza emiterowego. W wyniku obniżenia bariery, elektrony z obszaru typu N pokonują ją, zwiększając strumień elektronów przechodzących z emitera do bazy, a potem do kolektora. Elektrony te zwiększają prąd kolektora w znacznie większym stopniu, niż elektrony, które powstały w wyniku generacji par elektron-dziura bezpośrednio w obszarze bazy pod wpływem oświetlenia. W ten sposób zachodzi wewnętrzne wzmocnienie prądu fotoelektrycznego (współczynnik wzmocnienia wynosi $100 \div 700$).



Rys. 11.11. Symbole graficzne fototranzystorów: a) bez wyprowadzonej końcówki bazy; b) z wyprowadzoną końcówką bazy [11]

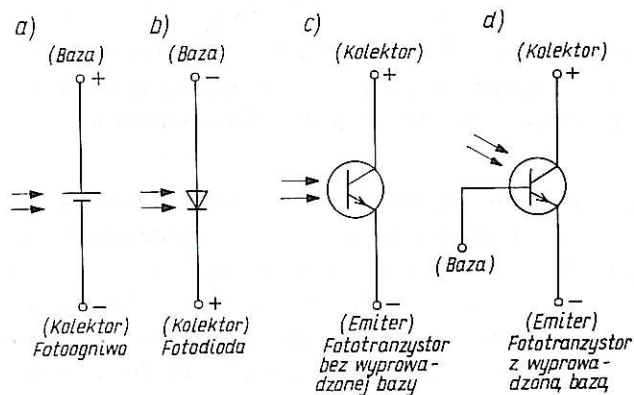


Rys. 11.12. Zasada działania fototranzystora [11]

W fototranzystorach końcówka bazy może być wyprowadzona lub nie wyprowadzona na zewnątrz obudowy (rys. 11.13). W związku z tym fototranzystor może pracować jako:

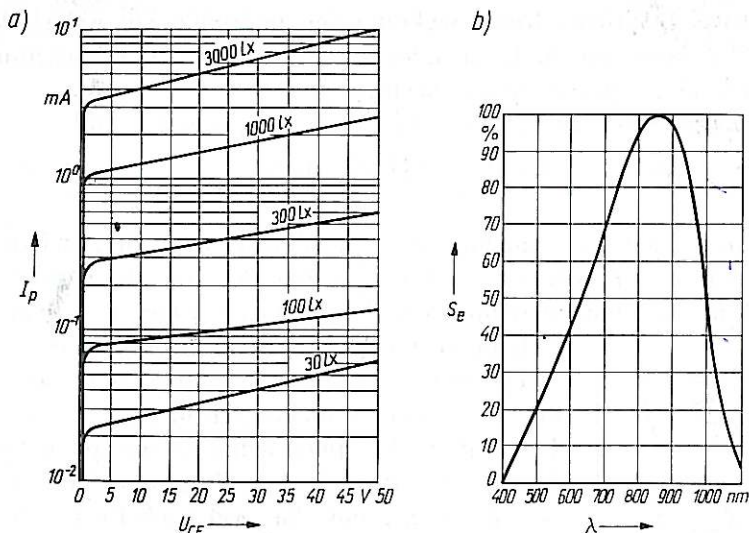
1. **Fotoogniwo** (wykorzystuje się złącze kolektor-baza — rys. 11.13a).
2. **Fotodioda** (wykorzystuje się złącze kolektor-baza, przy polaryzacji zaporowej — rys. 11.13b).
3. **Fototranzystor bez wyprowadzonej końcówki bazy** (pracuje jako normalny fototranzystor — rys. 11.13c).
4. **Fototranzystor z wyprowadzoną końcówką bazy** (można go niezależnie sterować optycznie i elektrycznie — rys. 11.13d).

Fototranzystor ma większą czułość w porównaniu z fotodiodą.



Rys. 11.13. Fototranzystor może pracować jako: a) fotoogniwo; b) fotodioda; c) fototranzystor bez wyprowadzonej końcówki bazy; d) fototranzystor z wyprowadzoną bazą [11]

Kształt charakterystyki prądowo-napięciowej (rys. 11.14a) fototranzystora jest identyczny z kształtem charakterystyki konwencjonalnego tranzystora. Ze wzrostem temperatury złącza zwiększa się **prąd ciemny** i **prąd fotoelektryczny**. Wartość prądu ciemnego zależy również od napięcia U_{CE} . Również kształt jego charakterystyki **czułości widmowej** jest bardzo zbliżony do analogicznych charakterystyk fotodiod. Na rysunku 11.14b przedstawiono typową charakterystykę czułości widmowej fototranzystora. Czułość fototranzystora zwiększa się wraz ze wzrostem napięcia polaryzacji. Istotny wpływ na czułość ma kierunek padającego promieniowania.



Rys. 11.14. Fototranzystor: a) charakterystyka prądowo-napięciowa; b) charakterystyka czułości widmowej [11]

11.2.4. Fototyrystor

Fototyrystorem jest tyrystor umieszczony w specjalnej obudowie, umożliwiającej oddziaływanie promieniowania świetlnego na jego przełączanie ze stanu blokowania do przewodzenia. Im większe jest napięcie anoda-katoda fototyrystora, tym moc promieniowania potrzebna do przełączenia jest mniejsza. Istotną cechą fototyrystorów jest to, że po przełączeniu ich w stan przewodzenia, utrzymują się w nim nawet po zaniku impulsu świetlnego.

Elementy te są głównie wykonywane z krzemu, wykorzystywane np. jako przekaźniki fotoelektryczne.

11.3. Półprzewodnikowe wskaźniki cyfrowe

11.3.1. Rodzaje wskaźników cyfrowych

Półprzewodnikowym wskaźnikiem cyfrowym nazywamy przyrząd półprzewodnikowy zbudowany z diod świecących, który pod wpływem sygnałów elektrycznych wyświetla informację w postaci cyfr.

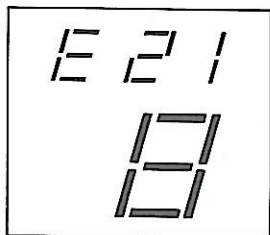
Ze względu na technologię wykonania rozróżnia się wskaźniki cyfrowe:

- **hybrydowe**, powstające w wyniku naniesienia diod świecących na izolacyjne podłoże struktur półprzewodnikowych;

- **hybrydowe światłowodowe**, wykonywane podobnie jak wskaźniki hybrydowe, z tym że na diody są nałożone światłowody, dzięki czemu dioda oświetla większą powierzchnię (segmentu);
- **monolityczne**, wykonywane z jednej warstwy półprzewodnika.

Wskaźniki hybrydowe charakteryzują się dużą wysokością wyświetlanego znaku.

Obecnie produkuje się segmentowe i mozaikowe wskaźniki cyfrowe. We **wskaźnikach segmentowych**, znak (cyfra) jest tworzony w wyniku wybrania określonej kombinacji segmentów. Najczęściej stosuje się 7-segmentowy



Rys. 11.15. Siedmiosegmentowy wskaźnik cyfrowy [11]

układ cyfr w kształcie ósemki (rys. 11.15). Wskaźnik 7-segmentowy umożliwia odtworzenie wszystkich cyfr ($0 \div 9$) oraz niektórych liter (A, C, E, F, H, I, L, O, P, S, U); przeważnie są one pochylone pod kątem 10° . Przy większych długościach segmentu (np. powyżej 2 mm dla diod GaAsP), w celu zwiększenia powierzchni świecącej, stosuje się szeregowe połączenia kilku diod świecących lub światłowody. We wskaźnikach segmentowych, wszystkie anody (względnie katody) diod w obrębie danego wskaźnika mają wspólne połączenia elektryczne.

Wskaźniki mozaikowe składają się z wielu diod świecących, a odpowiednią konfigurację znaku uzyskuje się w wyniku wybrania pojedynczych diod, które będą tworzyć dany znak. Wskaźniki tego typu są nazywane również wskaźnikami **alfanumerycznymi**. Wskaźniki mozaikowe umożliwiają odtworzenie wszystkich liter i cyfr, a nawet pewnych symboli. Najczęściej spotykane wskaźniki mozaikowe składają się z 35 (7×5) pojedynczych diod świecących (jest to minimalna liczba).

Wysokość wyświetlanego znaku zależy od konstrukcji wskaźnika cyfrowego. Przy wysokości znaku równej 20 mm, odczyt wyświetlanej informacji jest możliwy z odległości około 10 m, natomiast przy wysokości znaku równej 3 mm — odległość ta zmniejsza się do około 1 m. Diody świecące, stosowane we wskaźnikach cyfrowych, wykonuje się ze związków *galu* (GaAsP oraz GaP).

11.3.2. Właściwości wskaźników cyfrowych

Półprzewodnikowe wskaźniki cyfrowe, obecnie najczęściej stosowane, mają następujące zalety:

- mała wartość napięcia zasilającego;
- duża niezawodność;
- duża szybkość działania;

- dobra czytelność;
- duża powierzchnia cyfry w stosunku do objętości wskaźnika;
- duży kąt obserwacji;
- różnorodność barw.

Wadą wskaźników jest natomiast duży pobór prądu i małe wymiary cyfr.

Parametrami półprzewodnikowych wskaźników cyfrowych są:

- **napięcie przewodzenia diod w segmencie**, wykonanych z GaAsP — 1,7 V, a wykonanych z GaP — 2,1 V. Jeżeli napięcie przewodzenia będzie większe od wymienionego, to świadczy to o szeregowym połączeniu diod w segmencie. Maksymalna wartość napięcia wstecznego wynosi około $3 \div 4$ V dla każdej diody;
- **maksymalny prąd przewodzenia segmentu** — przeciętnie wynosi on kilkadziesiąt mA i zależy od konstrukcji wskaźnika;
- **maksymalny kąt obserwacji** — około 160° , przy spadku natężenia światła do 0,1 wartości maksymalnej. Zależy on od stopnia płaskości elementu świecącego oraz od jego umieszczenia w obudowie.

Wskaźniki cyfrowe znalazły zastosowanie w:

- przyrządach pomiarowych (miernikach cyfrowych, licznikach, testerach, wskaźnikach w elektrowniach i urządzeniach zasilających);
- maszynach matematycznych, terminalach do wprowadzania i wyprowadzania danych;
- elektronice powszechnego użytku (kalkulatorach, zegarach cyfrowych, wskaźnikach optycznych w środkach komunikacji miejskiej itp.).

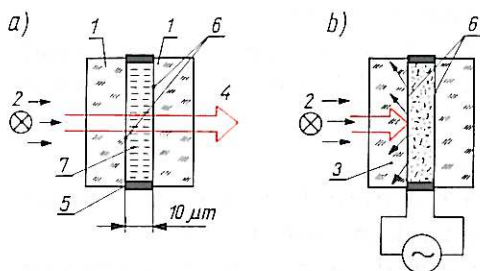
11.4. Wskaźniki ciekłokrystaliczne (LCD)

11.4.1. Podstawowe właściwości wskaźników LCD

Wskaźniki LCD (ang. *Liquid Crystal Display*) są to wskaźniki zawierające substancje zwane **ciekłymi kryształami**. Są to takie substancje organiczne, które w określonym przedziale temperatury wykazują jednocześnie właściwości zarówno ciał stałych, krystalicznych (właściwości optyczne i elektryczne), jak i cieczy (płynność). Ciekłe kryształy charakteryzują się niewielkimi siłami oddziaływań międzycząsteczkowych, i do ich uporządkowania są wystarczające małe siły elektrostatyczne. Strukturę ciekłego kryształu można przyrównać do dipoli umieszczonych w cieczy. W zależności od ułożenia tych dipoli wyróżnia się trzy możliwe struktury: smektyczną, nematyczną i cholesterolową. Najbardziej uporządkowaną wewnątrz jest **struktura smektyczna**, składająca się ze ściśle równoległych cząsteczek, ułożonych w przylegające warstwy. W **strukturze nematycznej**, dipole są usytuowane równo-

ległe, wszystkie w tym samym kierunku. **Struktura cholesterolowa** cechuje się równoległym ułożeniem dipoli w warstwach przesuniętych względem siebie o pewien kąt, co nadaje jej kształt śrubowy.

Zasadę działania wskaźnika ciekłokrystalicznego LCD przedstawiono na rys. 11.16. Wskaźnik zawiera dwie płytki szklane, między którymi znajduje się cienka (ok. $10\ \mu\text{m}$) warstwa ciekłego kryształu. Od środka są naniesione elektrody z przezroczystego materiału. W tak cienkiej warstwie dipole są uporządkowane samoistnie i padające światło przechodzi przez wskaźnik. Pod wpływem przyłożonego pola elektrostatycznego narusza się uporządkowanie wewnętrzne dipoli, powodując wewnętrzne rozpraszanie padającego strumienia światła; wskaźnik ciekłokrystaliczny przestaje być przezroczysty.



Rys. 11.16. Zasada działania wskaźnika ciekłokrystalicznego z rozpraszaniem dynamicznym: a) światło przechodzi; b) światło ulega rozproszeniu [14]

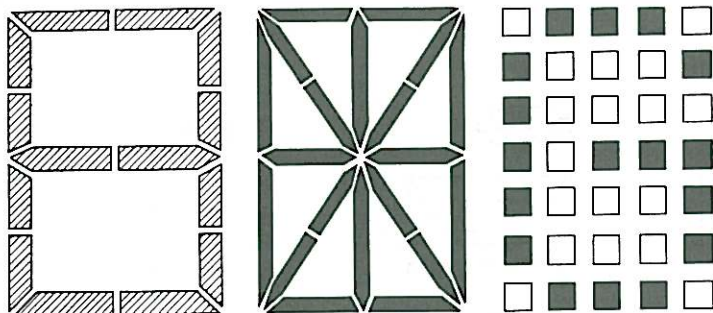
1 — płytki szklane, 2 — światło o polaryzacji kolowej, 3 — rozproszenie światła, 4 — światło po przejściu przez ciekły kryształ, 5 — izolacyjny materiał uszczelniający, 6 — elektrody, 7 — ciekły kryształ

Uzyskany stopień rozproszenia (kontrast) zależy od:

- temperatury,
- częstotliwości przebiegu sterującego,
- amplitudy napięcia sterującego,
- rodzaju użytego ciekłego kryształu,
- oświetlania i kierunku obserwacji.

Polaryzacja komórki LCD napięciem stałym szybko niszczy właściwości samouporządkowania cząsteczek ciekłego kryształu, z tego też powodu wskaźniki LCD steruje się napięciem zmiennym bez składowej stałej.

Aby na wskaźnikach przedstawiać cyfry i liczby, wytwarza się głównie układy 7- lub 16-segmentowych wyświetlaczy. Do wyświetlania liter jest najodpowiedniejsza matryca 35-punktowa. Na rysunku 11.17 pokazano przykładowe matryce. W powyższy sposób uzyskuje się obraz czarno-biały. Za pomocą ciekłych kryształów można również uzyskać obraz kolorowy. Opracowano mieszaniny ciekłych kryształów z barwnikami o wyraźnych właściwościach dichroicznych, to znaczy takich, które w zależności od orientacji przestrzennej cząsteczek absorbują światło o różnych długościach fal, czyli dają efekt barwny. Światło przechodzące przez wyświetlacz jest w kolorze barwnika dodanego do ciekłych kryształów. Obecnie produkuje się już odpowiednie barwniki: żółte, czerwone, niebieskie, zielone i pomarańczowe, a mieszanie ich umożliwia uzyskanie barw pośrednich, do głębokiej czerni włącznie. Zastosowanie wskaźników ciekłokrystalicznych jest powszechniejsze niż



Rys. 11.17. Matryce wyświetlające

wskaźników cyfrowych półprzewodnikowych. Z wielopunktowych wskaźników dichromatycznych są obecnie budowane wskaźniki LCD o matrycy zbudowanej z tak wielkiej liczby punktów, że stosuje się je jako wskaźniki telewizyjne zastępujące kineskop telewizora.

11.4.2. Wskaźniki LCD z rozproszeniem dynamicznym

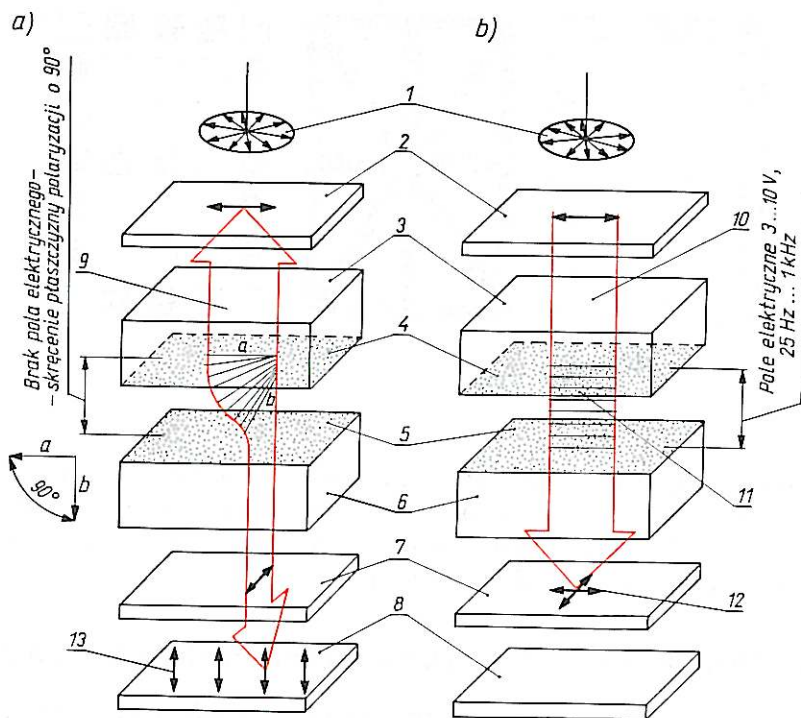
Zasadę działania wskaźników w rozproszeniu dynamicznym przedstawiono na rys. 11.16. Do jego budowy używa się ciekłych kryształów o strukturze smektycznej.

Przy braku zewnętrznego pola elektrycznego, padające światło przechodzi w całości przez warstwę ciekłego kryształu i po odbiciu od warstwy odbłaskowej powraca niestłumione do obserwatora. Przyłożenie zewnętrznego pola elektrostatycznego o amplitudzie $10 \div 50$ V powoduje nieregularne przeszczenie się dipoli ciekłego kryształu, co sprawia, że padające światło ulega silnemu rozproszeniu między elektrodami. Uzyskany kontrast wynosi wówczas 20:1. Główną wadę wskaźników LCD z rozproszeniem dynamicznym stanowi dość duży pobór mocy, wynoszący ok. $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

11.4.3. Wskaźniki LCD z efektem polowym

Wskaźnik LCD z efektem polowym charakteryzuje się małym poborem mocy (ok. $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$). Minimalna amplituda napięcia sterującego wynosi 3 V, tak że wskaźnik można zasiląć bezpośrednio ze struktury CMOS. Do budowy tego wskaźnika stosuje się ciekły kryształ o strukturze cholesterolowej.

Zasadę działania wskaźnika przedstawiono na rys. 11.18. Wskaźnik na górnej i dolnej płytce ma dodatkowo dwa polaryzatory o prostopadle usytuowanych osiach polaryzacji. Przy braku sygnału sterującego (rys. 11.18a), wiązka światła jest polaryzowana na górnym polaryzatorze, a potem skręcana o 90° w ciekłym kryształach. Wiazka ta przechodzi następnie przez dolny polaryzator



Rys. 11.18. Zasada działania wskaźnika ciekłokrystalicznego z efektem polowym: a) światło przechodzi; b) światło ulega rozproszeniu [14]
a, b — skręcone o 90° płaszczyzny ciekłego kryształu, 1 — światło o polaryzacji kołowej, 2, 7 — płytki polaryzujące, 3, 6 — płytki szklane, 4, 5 — elektrody, 8 — powierzchnia odbijająca światło, 9, 10 — wiązka światła, 11 — uporządkowane powierzchnie ciekłego kryształu, 12 — rozproszenie światła, 13 — odbicie światła

i po odbiciu od folii odblaskowej wraca tą samą drogą do obserwatora. Wskaźnik jest więc przezroczysty. Doprowadzenie napięcia zmiennego o amplitudzie $3 \div 10$ V i częstotliwości $25 \div 1000$ Hz (rys. 11.18b) powoduje równoległe ustawienie dipoli ciekłego kryształu, dzięki czemu uzyskuje się rozproszenie w dolnym polaryzatorze. W wyniku tego rozproszenia kontrast wynosi ok. 40:1.

Pytania kontrolne:

4. Na jakich zjawiskach jest oparte działanie elementów optoelektronicznych?
2. Porównaj zasadę działania diody elektroluminescencyjnej i złącza PN spolaryzowanego w kierunku przewodzenia.
3. Od czego zależy długość fali emitowanej przez diody LED?
4. Jaki kolor promieniowania emituje dioda (wykonana z GaAs), której szerokość pasma zabronionego wynosi 1,4 eV?

- 5*. Z jakiego materiału jest wykonana dioda LED, emitująca promieniowanie o długości fali równej 550 nm?
6. Porównaj parametry elektryczne i optyczne diod LED i fotodiody.
7. Co to jest szerokość polówkowa?
8. Co to jest częstotliwość graniczna?
9. Wymień zastosowania diod LED.
10. Przy użyciu katalogu:
 - a) sprawdź, jakie znaczenie mają diody LED;
 - b) porównaj parametry dwóch diod świecących, np. na czerwono;
 - c) znajdź największą i najmniejszą częstotliwość graniczną diod IR.
11. Na czym polega różnica między fotodiodą i fotokatodą?
12. Podaj różnice i podobieństwa między fotodiodą a fotoogniwem.
13. Omów zasadę działania fototranzystora.
14. Porównaj parametry optyczne fotodetektorów.
15. Jakie zalety ma tranzystor z wyprowadzoną końcówką bazy?
16. Porównaj wskaźniki cyfrowe i ciekłokrystaliczne.
17. Jakie parametry wskaźników cyfrowych półprzewodnikowych są zdeterminowane parametrami diod LED?
18. Co to są ciekłe kryształy? Jakie znasz zjawiska związane z rozpraszaniem światła we wskaźnikach ciekłoelektrycznych?
19. Gdzie wykorzystuje się wskaźniki cyfrowe?
20. Jakie są różnice między wskaźnikami ciekłokrystalicznymi z efektem polowym a wskaźnikami z rozproszeniem dynamicznym?

* Pawlaczyk A.: *Elementy i układy optoelektroniczne*.

PRZYPOMNIJ SOBIE:

Matematyka:

- Przebieg okresowy.
- Przebiegi niesinusoidalne.

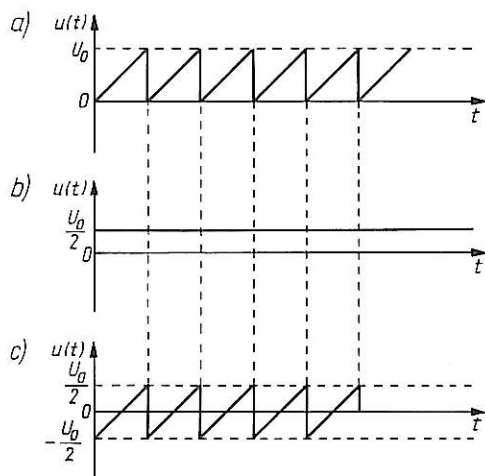
Elektrotechnika:

- Filtry częstotliwościowe.
- Związek między pulsacją i częstotliwością.

12. Parametry i funkcje układów elektronicznych

12.1. Wstęp

Elektronika zajmuje się głównie przetwarzaniem, przesyłaniem i odtwarzaniem informacji zakodowanych pod postacią przebiegów elektrycznych, nazywanych sygnałami elektrycznymi. Dzielimy je na analogowe i cyfrowe. **Sygnały analogowe**, np. prądu lub napięcia, mogą przyjmować dowolne poziomy. **Sygnały cyfrowe** mogą natomiast przyjmować tylko pewne ustalone poziomy. Opisujemy te sygnały za pomocą funkcji matematycznych lub wykresów graficznych (np. rys. 12.1). Bezpośrednia analiza (w funkcji czasu)



Rys. 12.1. Rozkład przebiegu okresowego (a) na składową stałą (b) i zmienną (c)

przenoszenia tych sygnałów przez układy elektroniczne jest bardzo utrudniona. W celu jej uproszczenia często wykorzystujemy **twierdzenie Fouriera**. Dany przebieg okresowy traktujemy wówczas jako odpowiadającą mu sumę składowych harmoniczných (przebiegów sinusoidalnych) i składowej stałej.

$$f(t+T) = F_0 + F_1 \sin(\omega_1 t + \psi_1) + F_2 \sin(2\omega_1 t + \psi_2) + \dots + F_n \sin(n\omega_1 t + \psi_n),$$

przy czym: F_0 — składowa stała, $F_1, F_2, \dots, F_n$ — amplitudy składowych harmoniczných, $\omega_1 = 2\pi/T$ — pulsacja pierwszej harmonicznej, T — okres przebiegu, $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ — fazy początkowe harmoniczných.

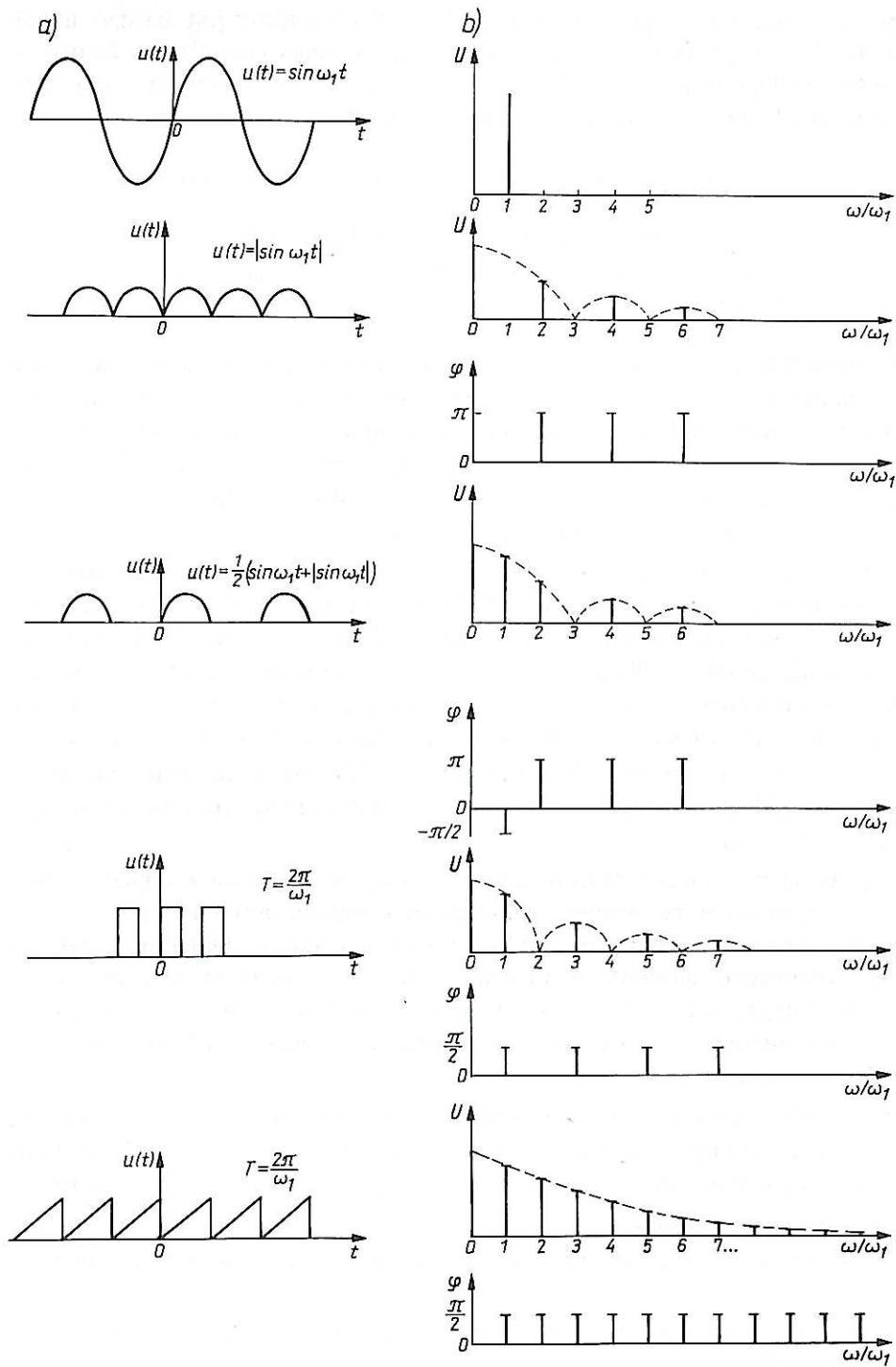
Z rozkładem sygnału na szereg Fouriera wiążą się pojęcia: **składowa stała** i **składowa zmienna**, szczególnie użyteczne podczas analizy pracy układów elektroniczných. Składowa zmienna jest to suma wszystkich przebiegów harmoniczných. Na rysunku 12.1a przedstawiono przykładowy przebieg napięcia w funkcji czasu, na rys. 12.1b — składową stałą tego przebiegu, a na rys. 12.1c — jego składową zmienną.

Sygnał można również przedstawić w postaci **widma częstotliwościowego**, tj. wykresu graficznego wartości amplitud harmoniczných w funkcji częstotliwości. Składową harmoniczną o danej amplitudzie i częstotliwości kreślimy w kształcie prążka o długości równej wartości amplitudy, i umieszczamy go na osi poziomej (f) w miejscu odpowiadającym wartości częstotliwości. Składową stałą zaznaczamy jako harmoniczną o częstotliwości 0 Hz. W ten sposób powstaje **widmo dyskretne** (rys. 12.2) nazywane **widmem prążkowym**. Odległość między sąsiednimi harmonicznymi (prążkami) wynosi $\omega_1 = 2\pi/T = 2\pi f_1$.

Zazwyczaj w układach elektroniczných mamy do czynienia z sygnałami nieokresowymi. Przy rysowaniu widma takiego sygnału przyjmujemy, że jest to sygnał okresowy o okresie $T = \infty$ (nieskończoność). Odległości między poszczególnymi harmonicznymi będą zatem równe zeru; otrzymamy widmo ciągłe. Znając widmo sygnału oraz możliwości jego obróbki i przetwarzania, można w miarę przystępny sposób wytłumaczyć działanie większości urządzeń elektroniczných.

W dalszej części tego rozdziału będą przedstawione układy elektroniczne w postaci „czarnych skrzynek”. Nie wnikając w to, co się w nich znajduje, wyjaśnimy jedynie sposób przetwarzania sygnału wejściowego oraz podamy:

- funkcję przenoszenia;
- sygnał wejściowy (przebieg w funkcji czasu i jego widmo częstotliwościowe);
- sygnał wyjściowy (przebieg w funkcji czasu i jego widmo częstotliwościowe);
- symbol stosowany w schematach funkcjonalnych.



12.2. Wzmacniacze

Wzmacniacz jest to urządzenie elektroniczne, którego zadaniem jest proporcjonalne zwiększenie amplitudy wszystkich składowych widma sygnału wejściowego, bez zmiany ich wzajemnych proporcji. Podstawowym parametrem wzmacniacza jest **wzmocnienie**. Określa się je jako stosunek sygnału wyjściowego do wejściowego.

W zależności od tego, jaka wielkość jest sygnałem wejściowym, a jaka sygnałem wyjściowym wyróżniamy:

- wzmocnienie napięciowe
$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}};$$

- wzmocnienie prądowe
$$k_i = \frac{I_{wy}}{I_{we}};$$

- wzmocnienie prądowo-napięciowe
$$k_y = \frac{I_{wy}}{U_{we}};$$

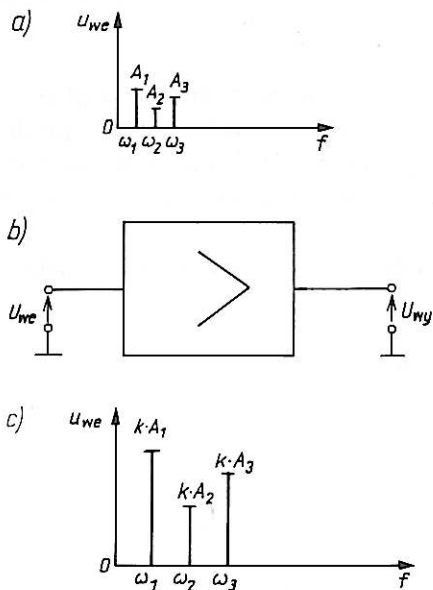
- wzmocnienie napięciowo-prądowe
$$k_z = \frac{U_{wy}}{I_{we}}.$$

Zwykle pisząc lub mówiąc „wzmacniacz” mamy na myśli wzmacniacz, którego sygnałem wejściowym i wyjściowym jest napięcie. W innym przypadku wyrażenie to zaznaczamy, pisząc np. wzmacniacz prądowy. Na rysunku 12.3c przedstawiono widmo sygnału wyjściowego przy założeniu, że sygnał wejściowy jest dany w postaci widma napięcia (rys. 12.3a) oraz, że wzmocnienie napięciowe wzmacniacza (rys. 12.3b) wynosi k . Ponieważ układ ten nie zmienia wzajemnych proporcji składowych harmonicznych, a więc i nie zmienia kształtu sygnału, zwiększa jedynie jego amplitudę. Na rysunku 12.4a przedstawiono przykładowy przebieg sygnału podanego na wejście wzmacniacza o wzmocnieniu równym k , a na rys. 12.4b przebieg sygnału otrzymany na wyjściu wzmacniacza. Sygnały te również różnią się jedynie amplitudą. Tak definiowany wzmacniacz jest strukturą idealną — wzmacniaczem idealnym. **Wzmacniacz rzeczywisty jest złożeniem wzmacniacza idealnego i filtra pasmowoprzepustowego.** Jeżeli napięcie wejściowe o widmie przedstawionym na rys. 12.5a podamy na wzmacniacz o charakterystyce wzmocnienia jak na rys. 12.5b, otrzymamy napięcie wyjściowe o widmie przedstawionym na rys. 12.5c.

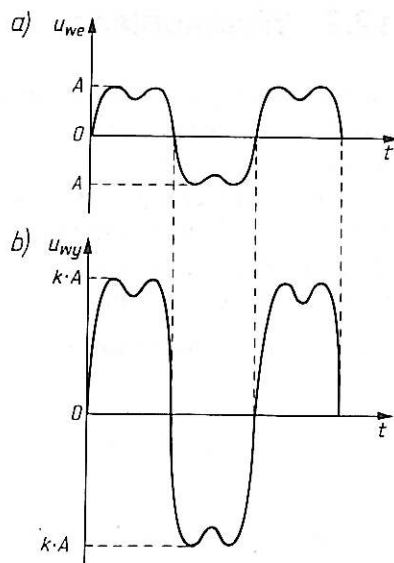
Wzmacniacz rzeczywisty oprócz wzmocnienia charakteryzują także **częstotliwości graniczne** (dolna f_d i górna f_g) zdefiniowane analogicznie jak dla filtrów. Jeżeli całe widmo sygnału wejściowego mieści się między dolną a górną częstotliwością graniczną wzmacniacza — to możemy traktować wzmacniacz jako układ idealny. Jeżeli natomiast układ nie spełnia tego warunku (deformuje widmo i kształt sygnału), to wzmacniacz traktujemy jako układ rzeczywisty.

W zależności od wartości częstotliwości granicznych rozróżniamy:

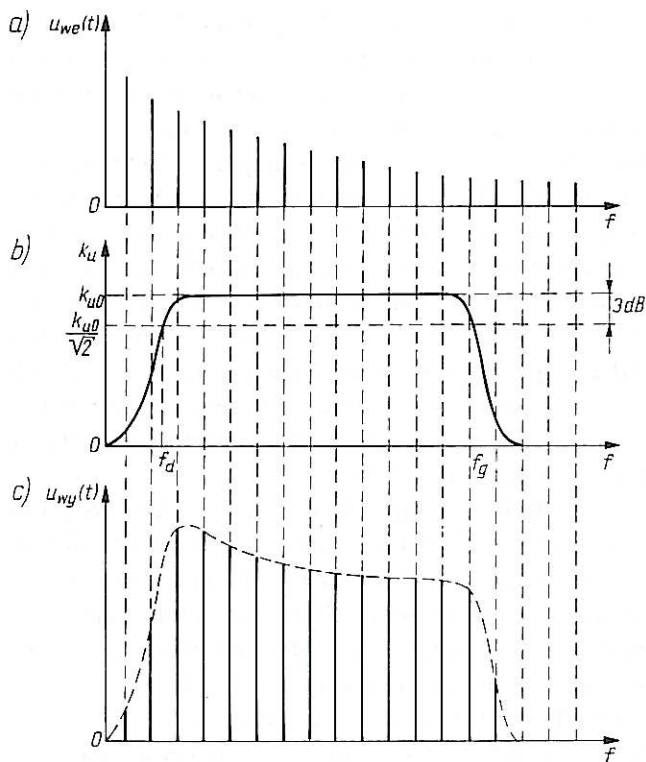
- **wzmacniacze m.cz.** (małych częstotliwości) — dla których częstotliwość f_d



Rys. 12.3 Wzmacniacz: a) widmo sygnału wejściowego; b) symbol wzmacniacza; c) widmo sygnału wyjściowego



Rys. 12.4. Wzmacniacz: a) sygnał wejściowy; b) sygnał wyjściowy

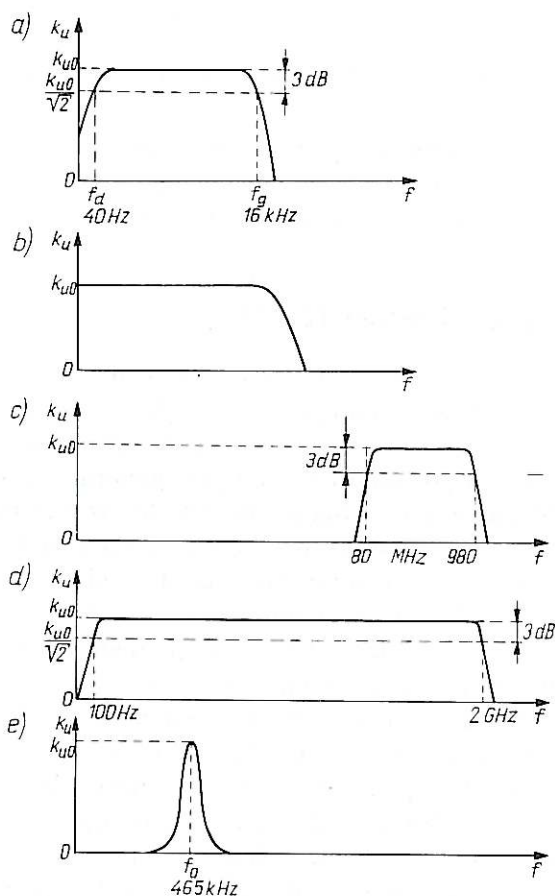


Rys. 12.5. Wzmacniacz rzeczywisty: a) widmo sygnału wejściowego; b) charakterystyka przenoszenia wzmacniacza; c) widmo sygnału wyjściowego k_{u0} — wartość maksymalna wzmocnienia

jest mniejsza niż 100 Hz, a częstotliwość f_g zawiera się w granicach od kilku do dwudziestukilku kHz (rys. 12.6a);

- **wzmacniacze stałoprądowe** — szczególny przypadek wzmacniacza rzeczywistego, którego pasmo wzmacnianych częstotliwości nie jest ograniczone od dołu (rys. 12.6b);
- **wzmacniacze w.cz** (wielkich częstotliwości) — stosowane do wzmacniania sygnałów wielkich częstotliwości (częstotliwość ich może zawierać się w szerokich granicach, tj. od setek kHz do setek MHz — rys. 12.6c);
- **wzmacniacze szerokopasmowe** — wzmacniacze o szczególnie szerokim pasmie przenoszenia sygnału; f_d i f_g różnią się przynajmniej o 3 rzędy wartości (rys. 12.6d);
- **wzmacniacze selektywne** (wąskopasmowe) — wzmacniają sygnał w wąskim przedziale, w otoczeniu częstotliwości $f_0 = \sqrt{f_d f_g}$ (f_d i f_g różnią się niewiele od siebie — rys. 12.6e).

W omawianej grupie układów elektronicznych należy zwrócić uwagę na **wzmacniacz różnicowy**. Układ ten ma dwa wejścia: odwracające — ozna-



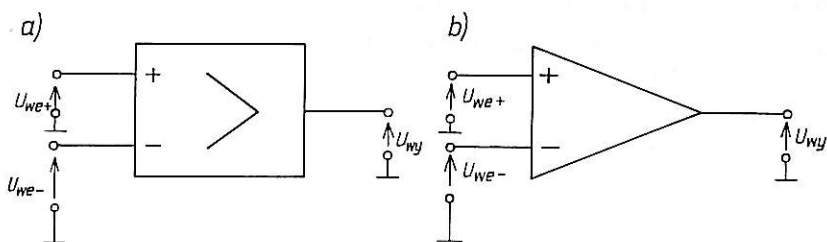
Rys. 12.6. Przykładowe charakterystyki: a) wzmacniacza m.cz.; b) wzmacniacza stałoprądowego; c) wzmacniacza w. cz; d) wzmacniacza szerokopasmowego; e) wzmacniacza selektywnego

czone znakiem "–" i nieodwracające — oznaczone znakiem "+". Napięcie wyjściowe tego wzmacniacza wyraża się wzorem

$$U_{wy} = k (U_{we+} - U_{we-}).$$

Szczególnym rozwiązaniem wzmacniacza różnicowego jest **wzmacniacz operacyjny**, charakteryzujący się:

- 1) nieskończenie dużym wzmocnieniem,
- 2) nieskończenie szerokim pasmem przenoszenia,
- 3) rezystancją wejściową równą nieskończoności,
- 4) rezystancją wyjściową równą zeru.



Rys. 12.7. Symbole wzmacniacza: a) różnicowego; b) operacyjnego

Z przytoczonych parametrów wynika, że jest on wzmacniaczem idealnym. Na rysunku 12.7a przedstawiono symbol wzmacniacza różnicowego, a na rys. 12.7b — wzmacniacza operacyjnego.

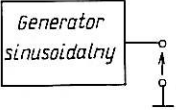
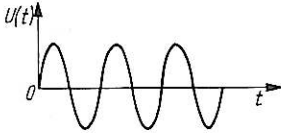
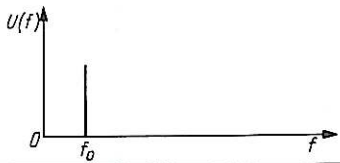
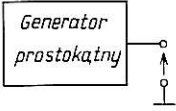
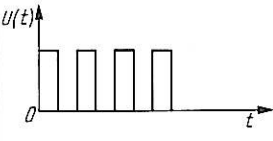
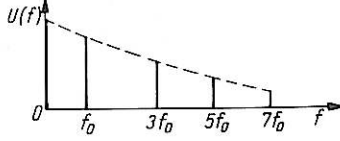
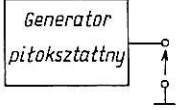
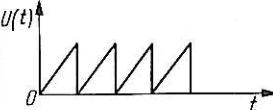
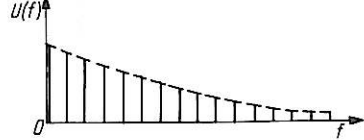
12.3. Generatory

Generatory są to układy elektroniczne, które przetwarzają energię źródła przebiegu stałego na energię przebiegu zmiennego wyjściowego (impulsowego lub okresowego). W zależności od kształtu wytwarzanego przebiegu, wyróżniamy następujące generatory: **impulsowe, sinusoidalne, przebiegu prostokątnego i liniowego (trójkątnego, piłokształtnego).** W tablicy 12.1 przedstawiono typowe symbole generatorów oraz kształty sygnałów wyjściowych i odpowiadające im widma częstotliwościowe.

Szczególnymi rodzajami generatorów są: generatory wyzwalane, synchronizowane i generatory sterowane (prądem lub napięciem). **Generatory wyzwalane** są to takie generatory, w których pojawienie się na wyjściu impulsu zadanego kształtu lub ciągu impulsów jest uwarunkowane wcześniejszą obecnością na wejściu impulsu wyzwalającego.

Natomiast **generatory synchronizowane** wytwarzają przebieg o zadanym kształcie bez względu na to, czy na jego wejściu są obecne impulsy pobudzające czy też nie. Impulsy te służą jedynie do ustawienia fazy (i ewentualnie do niewielkiej korekty częstotliwości) generowanego sygnału.

Podstawowe rodzaje generatorów

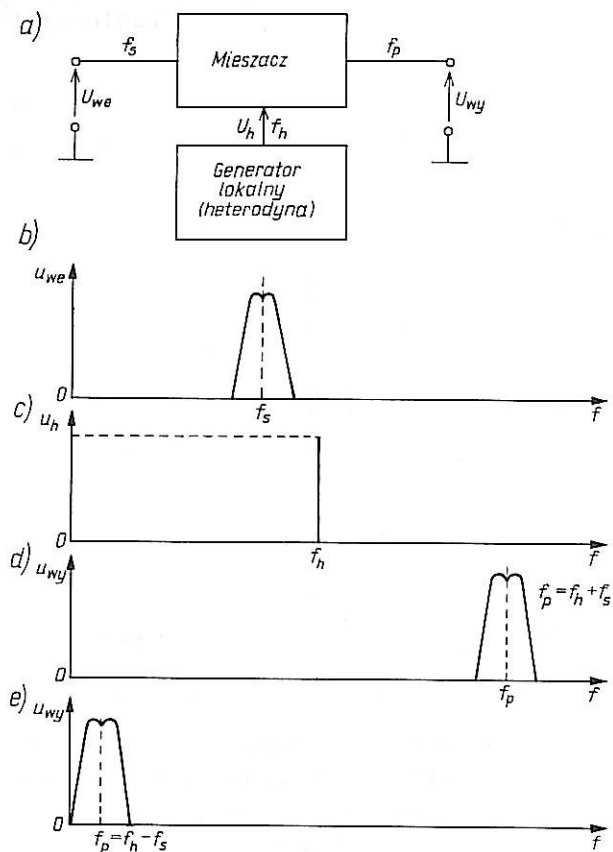
Generator	Przebieg sygnału w czasie	Widmo sygnału
		
		
		

Generatory sterowane są to takie generatory, których częstotliwość (lub wypełnienie przebiegu) jest uzależniona od wartości napięcia lub prądu sygnału wejściowego. Z tej grupy są najczęściej stosowane generatory sterowane napięciem — VCO (ang. *Voltage Controlled Oscillator*).

12.4. Układy przemiany częstotliwości

Przemiana częstotliwości (zwana inaczej **mieszaniem częstotliwości**) polega na przesunięciu widma sygnału wejściowego na osi częstotliwości bez zmiany pozostałych cech sygnału. Pozwala ona na umieszczenie widma sygnału w takim zakresie częstotliwości, w którym można przeprowadzić w prostszy sposób inne operacje — na przykład, takie jak wzmocnienie czy filtracja.

W skład układu przemiany częstotliwości (rys. 12.8a) wchodzi mieszacz i generator lokalny przebiegu sinusoidalnego (heterodyna). Do mieszacza dochodzi sygnał wejściowy z heterodyny oraz sygnał sinusoidalny (rys. 12.8c) o częstotliwości f_h . Sygnał wejściowy (rys. 12.8b) o częstotliwości środkowej f_s zostaje w mieszaczu przesunięty w funkcji częstotliwości, w wyniku czego uzyskujemy nowy sygnał (rys. 12.8d) o częstotliwości środkowej f_p , nazywanej **częstotliwością pośrednią**. Najczęściej jest to sygnał różnicowy o częstotliwości $f_p = f_h - f_s$ (rys. 12.8e), znacznie rzadziej o częstotliwości $f_p = f_h + f_s$ (rys. 12.8d).



Rys. 12.8. Układ przemiany częstotliwości

a) schemat blokowy; b) przykładowe widmo sygnału wejściowego; c) widmo sygnału heterodyny (generatora lokalnego); d) widmo sygnału wyjściowego przy przemianie sumacyjnej; e) widmo sygnału wyjściowego przy przemianie różnicowej

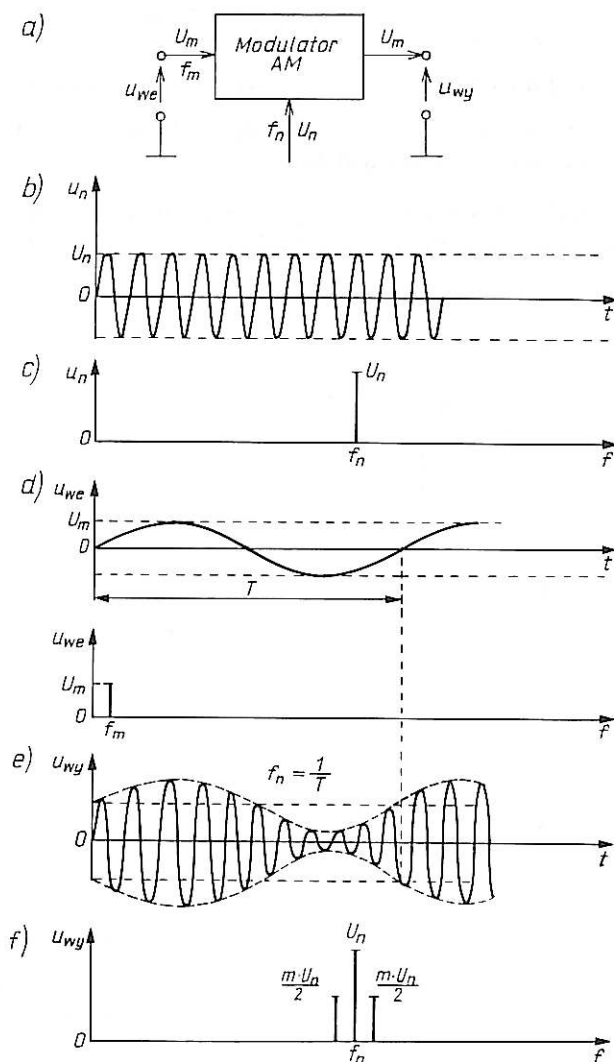
12.5. Modulatory

Przesyłanie sygnału w jego naturalnym pasmie za pomocą fal radiowych jest prawie we wszystkich przypadkach niemożliwe. Istnieją natomiast takie zakresy fal elektromagnetycznych, których propagacja (przesyłanie) nie narządza żadnych kłopotów natury technicznej. Wykorzystuje się to, kodując informację o sygnale w tym zakresie fal. Proces ten nazywamy **modulacją**. Po przesłaniu rozkodowuje się sygnał, przywracając mu jego naturalne widmo. Ten proces z kolei — nazywamy **demodulacją**. Istnieje wiele rodzajów modulacji i odpowiadających im demodulacji. Jeżeli np. za pomocą sygnału, który chcemy przesłać (sygnału użytecznego) zmieniamy amplitudę sygnału sinusoidalnego (sygnału nośnego), to taką modulację nazywamy **modulacją amplitudy** (ang. *Amplitude Modulation* — **AM**). Jeżeli za pomocą sygnału użytecznego zmieniamy (modulujemy) częstotliwość sygnału nośnego, to taką modulację nazywamy **modulacją częstotliwości** (ang. *Frequency Modulation* — **FM**). Jeżeli za pomocą sygnału użytecznego zmienia-

my (modulujemy) fazę sygnału nośnego, to taką modulację nazywamy **modulacją fazy** (ang. *Phase Modulation* — **PM**). Częstotliwość sygnału nośnego jest zwykle co najmniej 5 razy większa od najwyższej harmonicznej sygnału użytecznego. Układ elektroniczny realizujący modulację nazywamy modulatorem.

12.5.1. Modulator AM

Na rysunku 12.9a przedstawiono symbol modulatora AM. Do modulatora dochodzi sygnał nośny i sygnał użyteczny. **Sygnał nośny** modulacji AM (przedstawiony przykładowo na rys. 12.9b) jest przebiegiem sinusoidalnym



Rys. 12.9. Modulator AM:
a) symbol; b) sygnał nośny;
c) widmo sygnału nośnego;
d) sygnał użyteczny; e) sygnał wyjściowy modulatora; f) widmo sygnału wyjściowego

w.cz. Jego amplituda jest stała i nie zmienia się w funkcji czasu. Na rysunku 12.9c przedstawiono jego widmo. Jeżeli przykładowo sygnał użyteczny jest sygnałem sinusoidalnym małej częstotliwości (jak na rys. 12.9d), to sygnał wyjściowy z modulatora będzie miał przebieg taki jak na rys. 12.9e. Jak widać **amplituda sygnału zmodulowanego odwzorowuje dokładnie kształt sygnału modującego.**

W zapisie matematycznym przedstawiamy:

- **sygnał użyteczny** jako $u_{we}(t) = U_m \sin \omega_m t$,

przy czym: $u_{we}(t)$ — wartość napięcia sygnału użytecznego w chwili t , U_m — amplituda sygnału użytecznego, ω_m — pulsacja sygnału użytecznego;

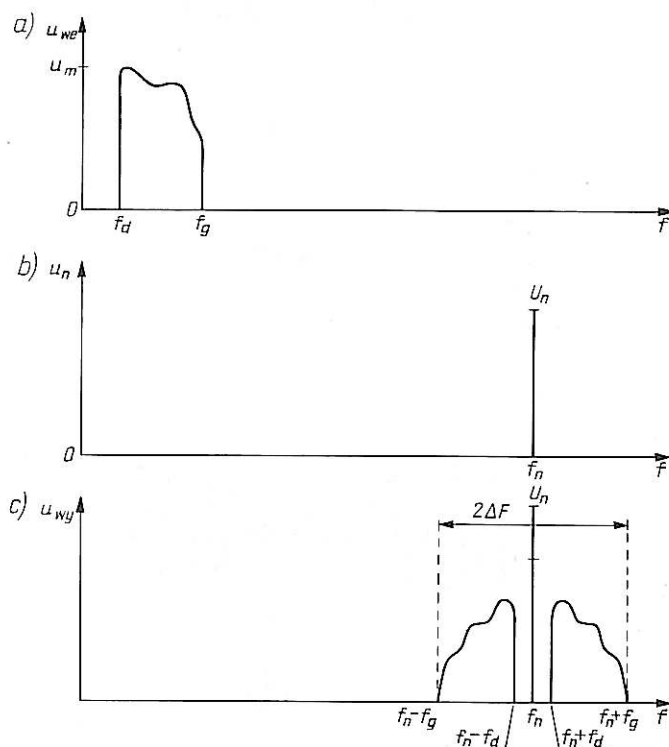
- **sygnał nośny** jako $u_n(t) = U_n \sin \omega_n t$,

przy czym: $u_n(t)$ — wartość napięcia sygnału nośnego w chwili t , U_n — amplituda sygnału nośnego, ω_n — pulsacja sygnału nośnego;

- **sygnał wyjściowy** jako $u_{wy}(t) = U_n(1 + m \sin \omega_m t) \sin \omega_n t$,

przy czym: $u_{wy}(t)$ — wartość napięcia sygnału wyjściowego w chwili t , $m = \frac{U_m}{U_n}$ — **współczynnik głębokości modulacji**.

Jeżeli sygnałem wejściowym jest bardziej złożony sygnał, to opis matematyczny staje się bardziej skomplikowany. O wiele prostsze będzie wówczas grafi-



Rys. 12.10. Modulator AM: a) widmo sygnału użytecznego; b) widmo sygnału nośnego; c) widmo sygnału wyjściowego

czne przedstawienie obróbki widma sygnału wejściowego w modulatorze AM. Na rysunku 12.10a przedstawiono widmo przykładowego sygnału użytecznego, na rys. 12.10b — widmo sygnału nośnego, a na rys. 12.10c — widmo sygnału wyjściowego z modulatora AM. Sygnał ten składa się z dwóch wstęg bocznych: dolnej (o paśmie częstotliwości od $f_n - f_g$ do $f_n - f_d$) i górnej (o paśmie częstotliwości od $f_n + f_g$ do $f_n + f_d$) oraz fali nośnej. Jak widać modulacja AM nie zmienia kształtu widma.

12.5.1. Modulatory FM i PM

Modulacja FM polega na uzależnieniu częstotliwości sygnału nośnego od amplitudy sygnału użytecznego. Sygnał zmodulowany częstotliwościowo ma stałą amplitudę. Jeżeli sygnał użyteczny jest sygnałem sinusoidalnym, to wartość chwilowa częstotliwości

$$f(t) = F_0 + \Delta F \sin \omega_m t ,$$

przy czym: F_0 — częstotliwość nośna, ω_m — pulsacja sygnału użytecznego, ΔF — dewiacja częstotliwości.

Dewiacja częstotliwości jest to maksymalna zmiana częstotliwości modulowanego sygnału FM. Jest ona proporcjonalna do amplitudy sygnału modulującego.

$$\Delta F = k U_m ,$$

przy czym: k — współczynnik, U_m — amplituda sygnału modulującego (użytecznego).

Widmo sygnału o zmodulowanej częstotliwości składa się ze znacznie większej liczby składowych niż widmo sygnału o zmodulowanej amplitudzie. Na rysunku 12.11a przedstawiono symbol modulatora FM, a na rys. 12.11b — widmo sygnału zmodulowanego częstotliwościowo sygnałem sinusoidalnym. Szerokość pasma zajmowanego przez sygnał zmodulowany częstotliwościowo, w praktyce ogranicza się do wartości

$$2\Delta F = 2f_g + 2\Delta F_0 ,$$

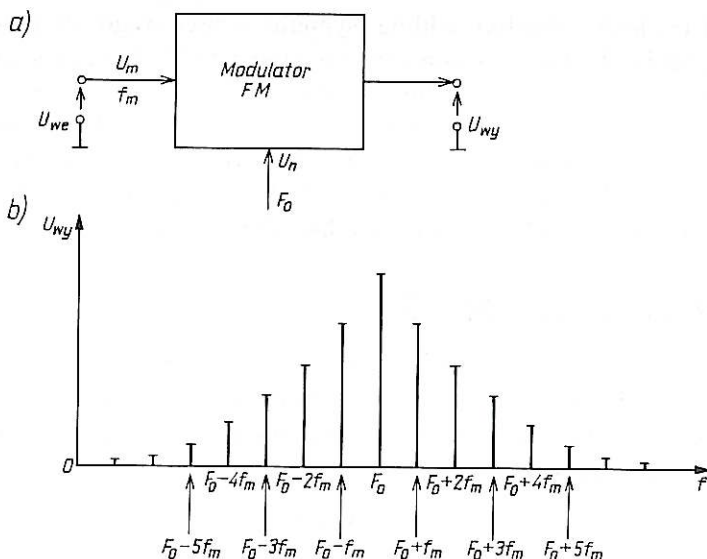
przy czym: f_g — górna częstotliwość graniczna sygnału użytecznego, ΔF_0 — dewiacja fali nośnej.

Modulacja częstotliwości jest nierozdzielnie związana z modulacją fazy — PM. Zmiana częstotliwości powoduje pośrednio zmianę fazy sygnału. Stąd właściwości obu tych modulacji są bardzo zbliżone. **Przy modulacji fazy, faza fali nośnej $\psi(t)$ zmienia się proporcjonalnie do wartości chwilowej napięcia sygnału użytecznego.**

Sygnał zmodulowany fazowo możemy zapisać w postaci

$$u_{PM}(t) = U_n \sin[2\pi F_0 t + \psi(t)] ,$$

przy czym: $u_{PM}(t)$ — wartość chwilowa napięcia zmodulowanego fazowo, U_n — amplituda sygnału nośnego, F_0 — częstotliwość sygnału nośnego.



Rys. 12.11. Modulator FM: a) symbol; b) widmo sygnału sinusoidalnego zmodulowanego sygnałem sinusoidalnym

Wartość chwilowa fazy $\psi(t) = k_1 u_{we}(t)$,

przy czym: k_1 — współczynnik, $u_{we}(t)$ — napięcie sygnału użytecznego.

Maksymalną zmianę fazy nazywamy **dewiacją fazy** i oznaczamy $\Delta\psi$.

Widmo sygnału zmodulowanego fazowo jest bardzo podobne do widma sygnału zmodulowanego częstotliwościowo.

Z tych dwu modulacji powszechnie jest stosowana tylko modulacja FM.

12.6. Demodulatory

Demodulacja jest procesem odwrotnym do modulacji. Zadaniem demodulatora jest przetworzenie sygnału podanego na wejście, aby w jego wyniku odzyskać sygnał użyteczny (zakodowany za pomocą modulacji) w zmodulowanym sygnale wejściowym. W zależności od przyjętego rodzaju modulacji, należy zastosować właściwy typ demodulatora. Każdy rodzaj modulacji ma tylko jeden właściwy sobie rodzaj demodulacji, pozwalający odzyskać nieznieskształcony sygnał użyteczny.

Sygnałem wejściowym dla demodulatora AM powinien być **sygnał zmodulowany amplitudowo**, czyli sygnał określony zależnością

$$u_{we}(t) = A(t) \sin \omega_n t ,$$

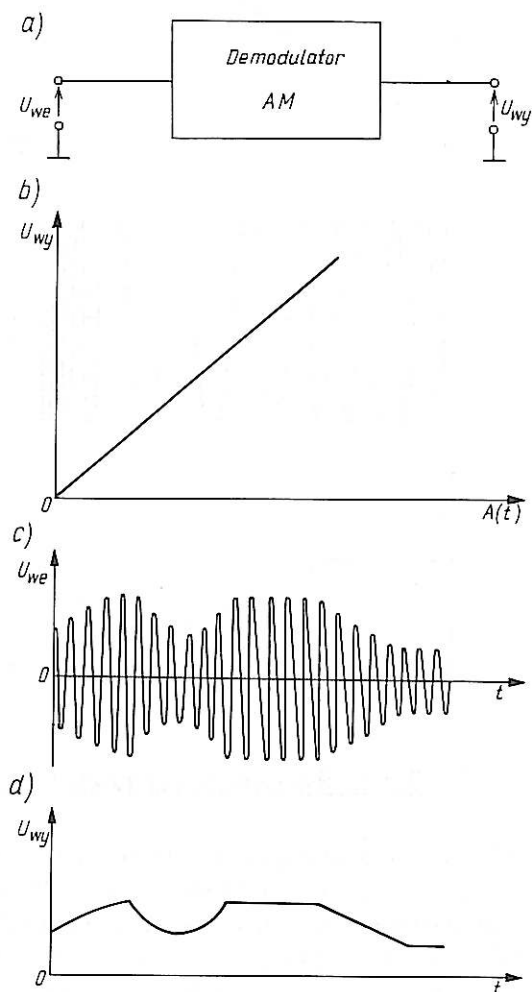
w której: $A(t)$ — wartość chwilowa amplitudy sygnału zmodulowanego amplitudowo, ω_n — pulsacja sygnału nośnego.

Zadaniem demodulatora AM jest wytworzenie sygnału wyjściowego, który będzie proporcjonalny do wartości chwilowej amplitudy sygnału zmodulowanego (tzn. w wierny sposób odwzorowującego kształt obwiedni sygnału zmodulowanego amplitudowo). Na rysunku 12.12b przedstawiono charakterystykę napięcia wyjściowego w funkcji amplitudy chwilowej przebiegu wejściowego demodulatora AM z rys. 12.12a. Przykładowy przebieg napięcia wejściowego podano na rys. 12.12c, a kształt przebiegu napięcia wyjściowego — na rys. 12.12d.

Sygnałem wejściowym dla demodulatora FM powinien być sygnał zmodulowany częstotliwościowo, czyli sygnał określony zależnością

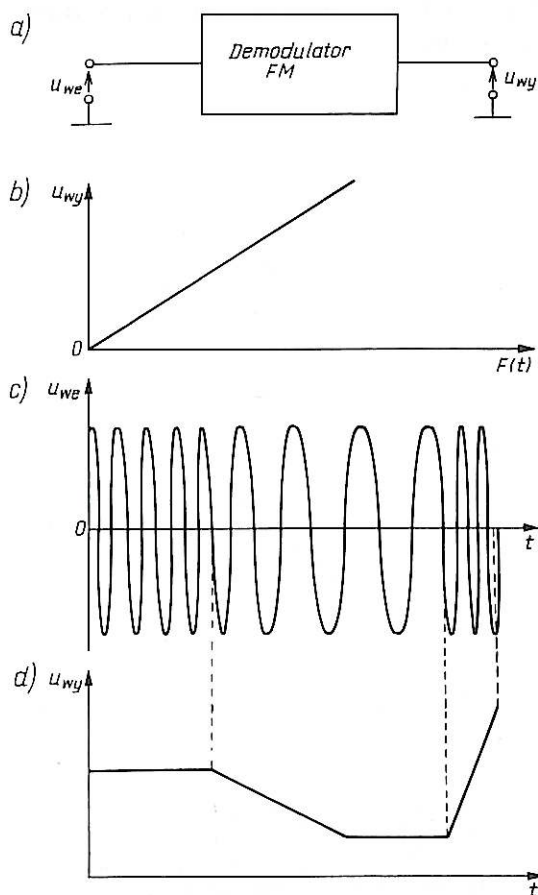
$$u_{we}(t) = U_n \sin[2\pi F(t)t] ,$$

w której $F(t)$ jest wartością chwilową częstotliwości.



Rys. 12.12. Demodulator AM: a) symbol; b) charakterystyka; c) przykładowy sygnał wejściowy; d) odpowiadający mu sygnał wyjściowy

Zadaniem demodulatora FM jest wytworzenie sygnału wyjściowego, który będzie proporcjonalny do chwilowej wartości częstotliwości sygnału zmodulowanego częstotliwościowo. Na rysunku 12.13b przedstawiono charakterystykę napięcia wyjściowego w funkcji częstotliwości chwilowej przebiegu wejściowego demodulatora FM z rys. 12.13a. Przykładowy przebieg napięcia wejściowego podano na rys. 12.13c, a kształt przebiegu napięcia wyjściowego — na rys. 12.13d.



Rys. 12.13. Demodulator FM: a) symbol; b) charakterystyka; c) przykładowy sygnał wejściowy; d) odpowiadający mu sygnał wyjściowy

12.7. Zasada odbioru radiowego

W tym rozdziale zajmiemy się nie tylko samym odbiorem, ale ogólnym przesyłaniem sygnału za pomocą fal radiowych. **Proces transmisji sygnału akustycznego** możemy podzielić na **nadawanie** i **odbiór**.

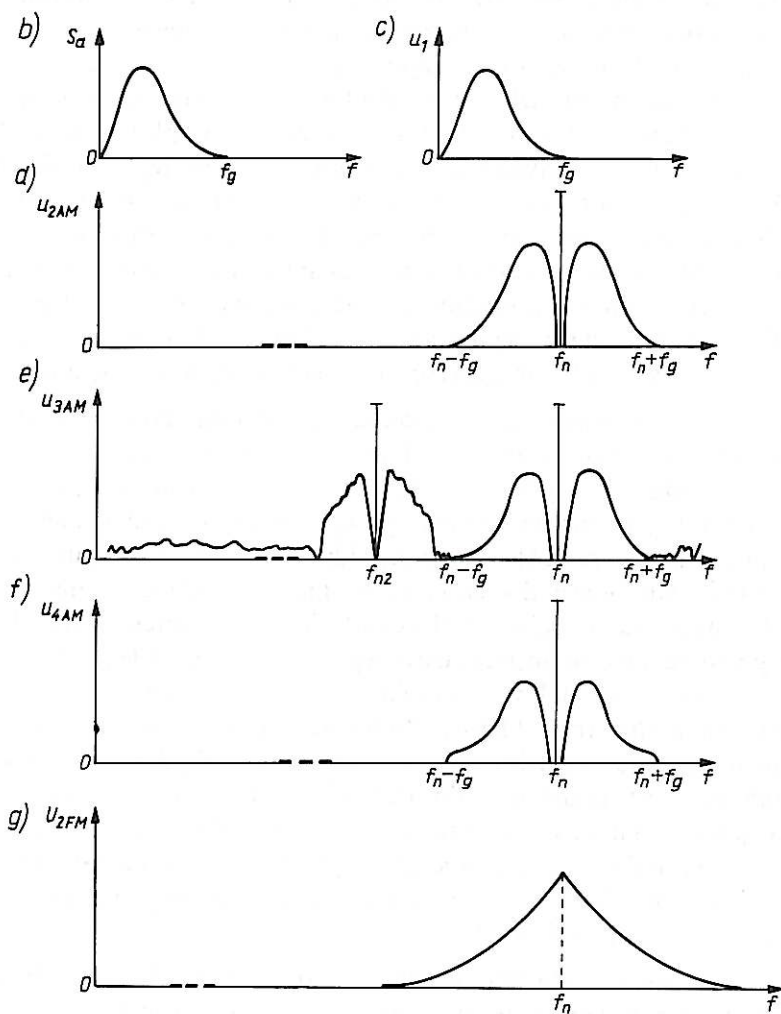
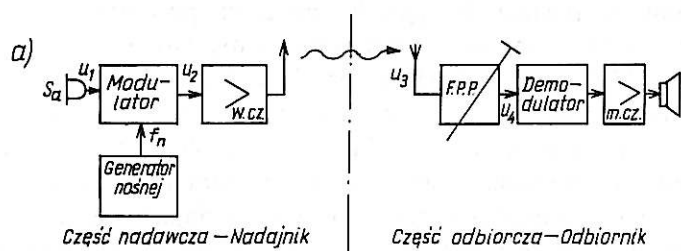
Na rysunku 12.14a przedstawiono schemat funkcjonalny zespołu nadajnika i odbiornika radiowego, w którym jest realizowana prosta metoda przekazywa-

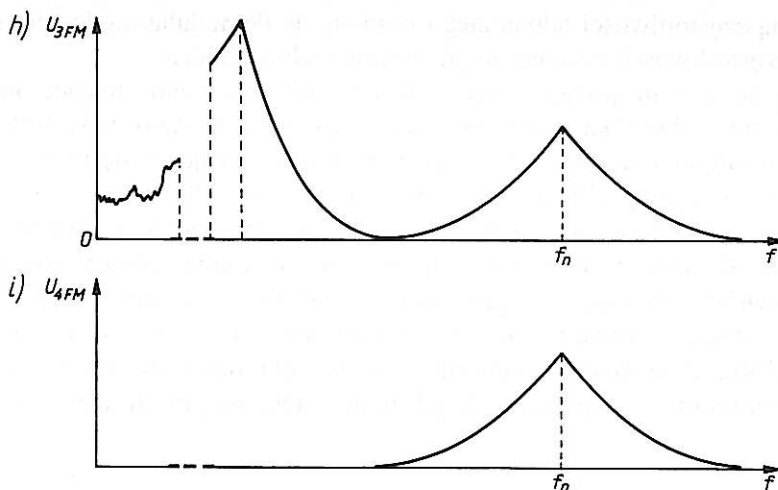
nia dźwięku. Linia przerywaną oddzielono część nadawczą (Nadajnik) od części odbiorczej (Odbiornik).

Sygnal akustyczny, w postaci drgających cząsteczek powietrza, przed przesłaniem musi być zamieniony na sygnał elektryczny. Do tego służy **mikrofon**. Na rysunku 12.14b przedstawiono przykładowe widmo sygnału akustycznego, a na rys. 12.14c — odpowiadające mu widmo sygnału elektrycznego uzyskane na wyjściu mikrofonu. Można zauważyć, że widma te mają taki sam kształt; poszczególne harmoniczne występują w takich samych proporcjach. Ponieważ sygnał akustyczny i odpowiadający mu sygnał elektryczny z mikrofonu zawierają składowe harmoniczne w (pasmie) zakresie częstotliwości od kilkunastu Hz do kilkunastu kHz, a tego zakresu częstotliwości nie transmituje się za pomocą fal radiowych, należy zatem przesunąć widmo tego sygnału w zakres wyższych częstotliwości. Do tego służy **modulator**. W zależności od zakresu częstotliwości, w którym jest przesyłane widmo tego sygnału, wykorzystuje się modulację amplitudową (AM) lub częstotliwościową (FM). Sygnał z mikrofonu jest przekazywany do modulatora. W zależności od tego, jaki modulator (AM czy FM) zastosujemy w nadajniku, takie widmo uzyskamy na jego wyjściu. Załóżmy, że jest to modulator AM. Wówczas widmo jego sygnału wyjściowego będzie takie jak na rys. 12.14d. Sygnał z modulatora podajemy następnie na **wzmacniacz**, który nie zmienia kształtu jego widma. Nadawanie kończy się wyemitowaniem fali radiowej (elektromagnetycznej) przez **antenę nadajnika**.

Faza odbioru rozpoczyna się w **antenie odbiornika** radiowego. Wewnątrz niej indukują się sygnały odpowiadające wszystkim docierającym do niej falom elektromagnetycznym. Na rysunku 12.14e przedstawiono przykładowe widmo sygnału, jaki uzyskalibyśmy na wyjściu anteny odbiorczej (przy zastosowaniu modulatora AM). Różnice widma z rys. 12.14d wynikają z tego, że do anteny odbiorczej docierają także fale pochodzące z innych źródeł (np.: od innych nadajników, zakłócenia). Sygnał z anteny przesyłamy do strojonego **filtru pasmowoprzepustowego**, w celu wydzielenia ze złożonego widma wszystkich sygnałów zaindukowanych w antenie, widma sygnału z naszego nadajnika (rys. 12.14f). Zwróćmy uwagę, że jest ono identyczne z widmem sygnału wyjściowego z modulatora. Wydzielony sygnał, po **wzmocnieniu**, jest podawany do **demodulatora**, który odtwarza sygnał m.cz. w jego oryginalnym pasmie (rys. 12.14c). Wzmocniony we wzmacniaczu m.cz. sygnał steruje **głośnik**, który przetwarza przebieg elektryczny na sygnał akustyczny. W ten sposób uzyskaliśmy transmisję sygnału akustycznego za pomocą fal radiowych.

Gdy do transmisji sygnału użyjemy modulatora (i demodulatora) FM, wówczas kształt widma sygnału na wyjściu modulatora będzie wyglądał tak, jak na rys. 12.14g. Identyczny będzie kształt sygnału na wejściu anteny nadawczej i sygnału emitowanego przez tę antenę. Zwróćmy uwagę, że przy modulacji FM widmo sygnału z modulatora zajmuje dużo szersze pasmo i jest





Rys. 12.14. Przesyłanie sygnału akustycznego drogą radiową: *a*) schemat funkcjonalny układu transmisji; *b*) widmo wejściowego sygnału akustycznego lub widmo sygnału akustycznego na wyjściu głośnika; *c*) widmo sygnału na wyjściu mikrofonu lub na wyjściu demodulatora; *d*) widmo sygnału na wyjściu modulatora AM; *e*) widmo sygnału zaindukowanego w antenie odbiorczej dla sygnału AM; *f*) widmo sygnału na wyjściu filtra pasmowoprzepustowego (na wejściu demodulatora AM; *g*) widmo sygnału na wyjściu modulatora FM; *h*) widmo sygnału zaindukowanego w antenie odbiorczej dla sygnału FM; *i*) widmo sygnału na wyjściu filtra pasmowoprzepustowego (na wyjściu demodulatora FM)

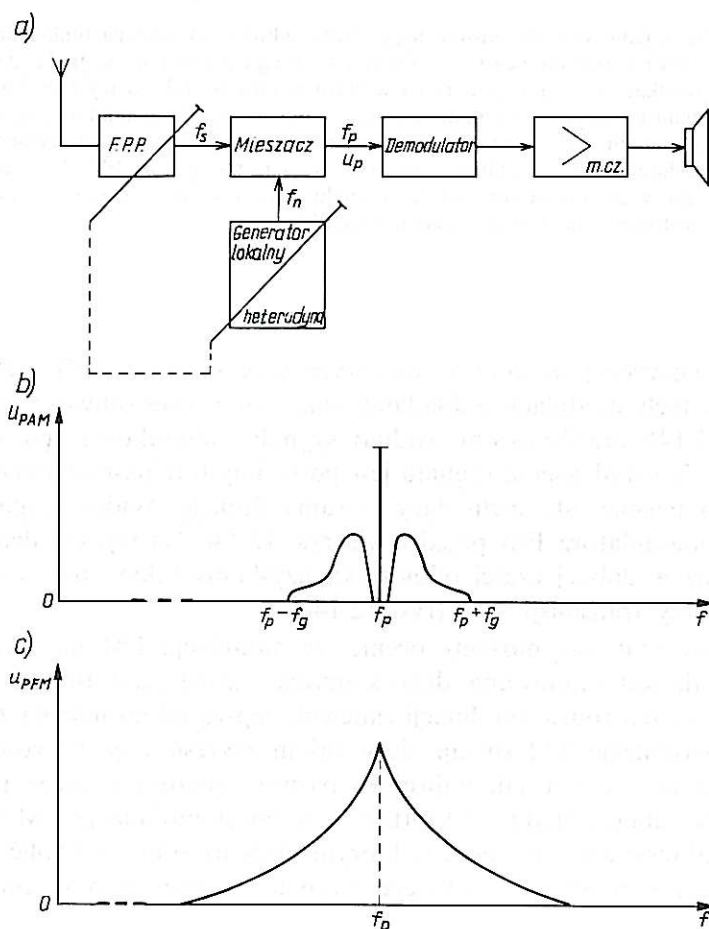
położone (zazwyczaj) w zakresie większych częstotliwości. Tylko dla porównania obu tych modulacji zakładamy taką samą częstotliwość nośną. Na rysunku 12.14*h* przedstawiono widmo sygnału zaindukowanego w antenie odbiorczej. Do wydzielenia sygnału jest potrzebny filtr pasmowoprzepustowy o szerszym pasmie, ale spełniający tę samą funkcję. Widmo sygnału wejściowego demodulatora FM przedstawia rys. 12.14*i*. Na wyjściu demodulatora FM oraz w dalszej części odbiornika uzyskamy takie samo widmo sygnału, jak przy transmisji AM (rys. 12.14*c*).

Na pierwszy rzut oka możemy ocenić, że modulacja FM nie ma żadnych zalet, a wadą jest zajmowanie dużo szerszego pasma częstotliwości. Okazuje się jednak, że ten rodzaj modulacji zapewnia lepszą odporność na zakłócenia i szumy. Modulację AM stosuje się w takim zakresie częstotliwości, w którym najistotniejsze jest jak najwęższe pasmo zajmowane przez przesyłany sygnał (fale: długie, średnie i krótkie), natomiast modulację FM stosujemy w takim zakresie częstotliwości, w którym możemy sobie pozwolić na znaczne poszerzenie pasma przesyłanego sygnału w celu poprawienia jakości transmisji.

Przedstawiony odbiornik radiowy nazywamy **odbiornikiem z bezpośrednim odbiorem**. Podstawową wadą tego typu odbiornika jest to, że wraz

ze zmianą częstotliwości odbieranego sygnału, do demodulatora dociera sygnał o innej częstotliwości, co staje się przyczyną wielu zakłóceń.

W związku z tym podjęto prace, zakończone sukcesem, mające na celu pozabawienie odbiornika radiowego tej wady. Opracowano tzw. **odbiornik superheterodynowy**, którego schemat funkcjonalny znajduje się na rys. 12.15. Antena i wejściowy filtr pasmowoprzepustowy w odbiorniku superheterodynowym odgrywają taką samą rolę jak w odbiorniku z bezpośrednim odbiorem. Różnica jakościowa wynika z zastosowania **układu przemiany częstotliwości** (mieszacz z generatorem lokalnym — heterodyną), który przesuw widmo sygnału z otoczenia częstotliwości f_s do częstotliwości f_p (rys. 12.15b). Przeloczenie odbiornika — w celu odebrania innego sygnału (o częstotliwości f_{s2}) — polega, tak jak poprzednio, na przestrojeniu obwodów



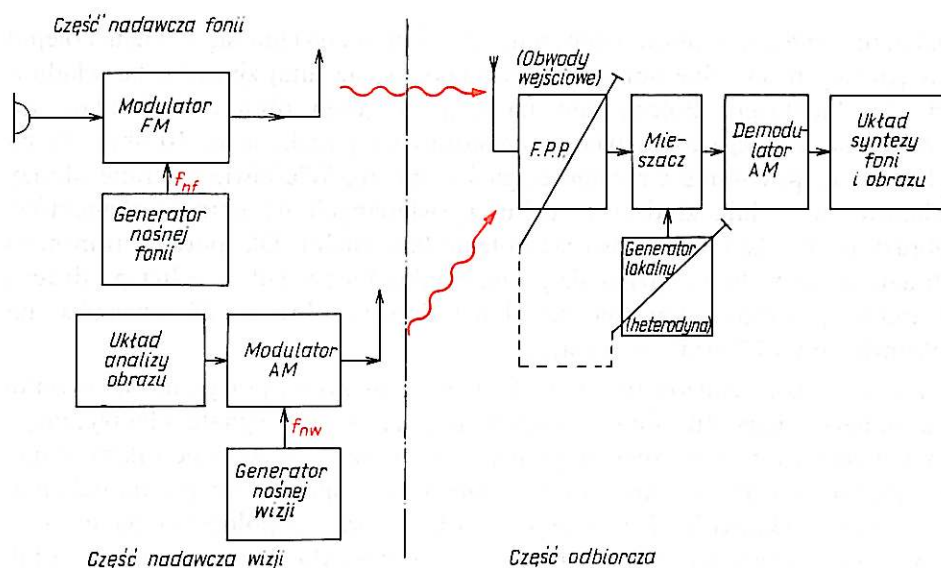
Rys. 12.15. Superheterodynowy odbiornik radiowy: a) schemat funkcjonalny; b) widmo sygnału na wyjściu mieszacza (wejście demodulatora) dla sygnału AM; c) widmo sygnału na wyjściu mieszacza (wejście demodulatora) dla sygnału FM

wejściowych, a poza tym na takiej zmianie częstotliwości heterodyny f_{h2} , aby był spełniony warunek $f_{h2} - f_{s2} = f_p$. Wynika stąd wniosek, że obwody wejściowe powinny być przestrajane współbieżnie z heterodyną (o taką samą wartość), przy czym f_{s2} należy interpretować jako częstotliwość środkową filtru pasmowoprzepustowego (obwodu wejściowego). Zachowanie tego warunku pozwala na przesuwanie widma dowolnie wybranego sygnału do częstotliwości pośredniej f_p , bez zmiany kształtu jego widma. W ten sposób, pomimo zmiany częstotliwości odbieranego sygnału, uzyskujemy stałą wartość częstotliwości sygnału docierającego do demodulatora. Na rysunku 12.15c przedstawiono widmo sygnału na wyjściu mieszacza przy transmisji FM, przy założeniu, że na jego wejściu jest sygnał o widmie jak na rys. 12.14g. Przebiegi napięć w innych miejscach układu i odpowiadające im widma są takie same jak dla odbiornika z bezpośrednim odbiorem. Wyraźnie należy zaznaczyć, że częstotliwość pośrednia przy transmisji AM (465 kHz) jest inna niż przy transmisji FM (10,7 MHz).

Odbiornik superheterodynowy jest stosowany praktycznie we wszystkich obecnie produkowanych odbiornikach radiowych.

12.8. Zasada transmisji telewizyjnej

Transmisja obrazu wraz z towarzyszącym mu dźwiękiem jest realizowana przez zespół urządzeń stanowiących tor nadawczy i odbiorczy, przedstawiony w sposób schematyczny na rys. 12.16. **Część nadawcza** składa się zasadniczo z dwóch oddzielnych układów: **nadajnika fonii** (dźwięku) i **nadajnika**



Rys. 12.16. Układ transmisji obrazu i dźwięku

wizji (obrazu). Nadajnik fonii jest taki sam jak nadajnik sygnału radiowego z rys. 12.14a. Nadajnik wizji składa się z:

- przetwornika obrazu na tzw. całkowity sygnał wizyjny,
- modulatora,
- wzmacniacza w.cz.,
- anteny nadawczej sygnału wizyjnego.

Częstotliwości nośne: sygnału wizji — f_{nw} i **sygnału fonii** — f_{nf} w danym standardzie telewizyjnym różnią się o stałą wartość

$$f_{nf} - f_{nw} = f_r,$$

przy czym f_r jest tzw. **częstotliwością różnicową**.

Część odbiorcza składa się z:

- filtru pasmowoprzepustowego,
- anteny,
- obwodów wejściowych,
- układu przemiany częstotliwości,
- demodulatora AM.

Układy te pełnią takie same funkcje jak w odbiorniku radiowym superheterodynowym.

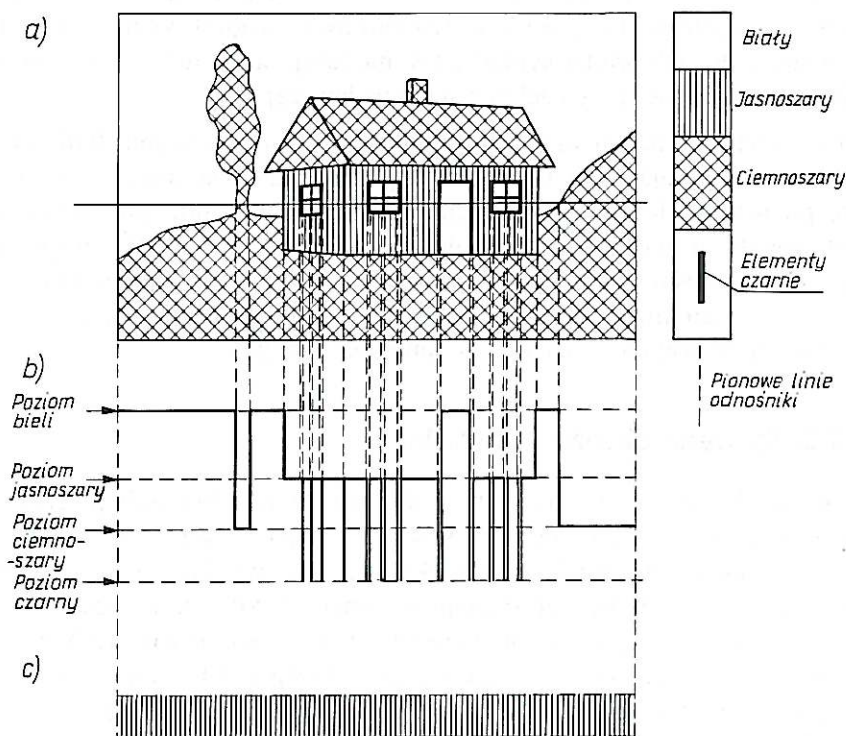
Sygnał po zdemodulowaniu jest podawany na układ syntezy obrazu i dźwięku, którego budowę i zasadę działania opiszemy w dalszej części książki. Układ ten powoduje odtworzenie obrazu na ekranie kineskopu i dźwięku w głośniku telewizora.

12.8.1. Analiza obrazu i dźwięku

Oglądany przez nas obraz telewizyjny czy kinowy składa się z wielu kolejno następujących po sobie obrazów. Wykorzystuje się tutaj zjawisko bezwładności oka ludzkiego. Polega ono na tym, że jeżeli obrazy docierające do naszych oczu będą się pojawiały z częstotliwością większą niż 10 obrazów na sekundę, to powstanie wrażenie ciągłości obrazu. Właściwie dobrane obrazy składowe wywołują złudzenie ruchu wyświetlanych na ekranie elementów. Obrazy te przedstawiają wówczas kolejne fazy ruchu. Dla potrzeb transmisji obrazu drogą radiową, dzieli się go na cienkie linie i nadaje jedną po drugiej w czasie przeznaczonym na przesłanie danego obrazu (**25 obrazów na sekundę, po 625 linii w obrazie**).

Analiza obrazu, realizowana przez kamerę telewizyjną, polega na utworzeniu dla danego elementu obrazu, odpowiadającego mu sygnału elektrycznego analogowego lub cyfrowego (ciąg liczb — próbek). W sygnale takim, danemu elementowi obrazu musi być w jednoznaczny sposób przypisana informacja o jego jaskrawości i ewentualnie kolorze oraz o położeniu na obrazie. Utworzony sygnał może być odtworzony bezpośrednio (zsyntetyzowany) lub zapisany, w celu późniejszego przesłania, przetworzenia lub odtworzenia.

Uzyskuje się to w wyniku przebiegania strumienia elektronowego punkt po punkcie analizowanej linii obrazu. Przetwarzanie obrazu, a tym samym jego odtworzenie w odbiorniku, jest tym dokładniejsze, im mniejsze są elementy poddane analizie (tj. węższe linie obrazu). Na rysunku 12.17a przedstawiono przykładowy analizowany obraz, na rys. 12.17b sygnał elektryczny analogowy odpowiadający linii zaznaczonej z boku rysunku strzałką, a na rys. 12.17c sygnał elektryczny cyfrowy odpowiadający tej samej linii.



Rys. 12.17. Analiza obrazu; a) obraz, na którym zaznaczono strzałką analizowaną linię; b) sygnał analogowy odpowiadający tej linii; c) sygnał cyfrowy

Na pierwszy rzut oka sygnał cyfrowy jest zupełnie niezrozumiały — nie powiązany logicznie z treścią analizowanej linii. W rzeczywistości jest to ciąg bitów jednoznacznie opisujący w sposób cyfrowy jasność (i ewentualnie kolor) każdego punktu analizowanej linii. W dalszej części rozdziału będziemy się zajmować tylko sygnałami analogowymi, ponieważ przed zsyntetyzowaniem sygnał cyfrowy jest zamieniany na sygnał analogowy.

Przesyланemu sygnałowi, odpowiadającemu na przykład drugiej linii obrazu — musi odpowiadać odtworzony (zsyntetyzowany) w odbiorniku sygnał, dający na ekranie tę samą linię obrazu (warunek synfazowości pracy). W celu zapewnienia współbieżności pracy nadajnika i odbiornika, oprócz **sygnału**

luminancji (to jest sygnału o jasności aktualnie analizowanego punktu), przesyła się **impulsy synchronizacji** poziomej i pionowej.

W celu zmniejszenia migotania przesyłanego obrazu, dzieli się go na dwa półobrazy; w pierwszym nadaje się linie nieparzyste, a w drugim — parzyste. W rezultacie w odbiorniku uzyskuje się 50 półobrazów na sekundę, po 312,5 linii (stąd **częstotliwość linii** — $312,5 \times 50 = 15\,625$ Hz, a **częstotliwość pola** = 50 Hz — ilość półobrazów na sekundę).

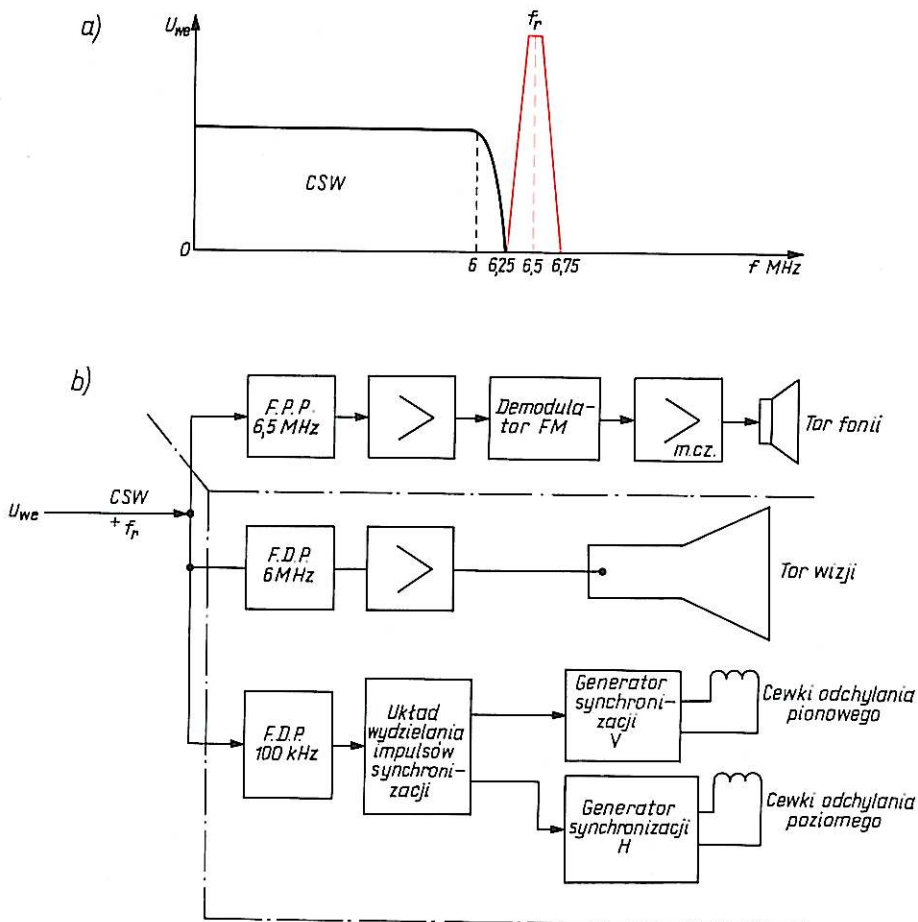
Sygnał luminancji (o pasmie od 15 625 Hz do 6 MHz) i sygnał synchronizacji, rozdzielone poziomem napięcia, tworzą **całkowity sygnał wizji** (CSW). Przed przesłaniem do odbiornika sygnał CSW moduluje amplitudowo sygnał nośny wizji o częstotliwości przydzielonej stacji nadawczej.

Jednocześnie z sygnałem wizji w nadajniku jest tworzony **sygnał fonii**. Drgania akustyczne docierające do mikrofonu są zamieniane na impulsy elektryczne, które po wzmacnieniu we wzmacniaczu m.cz. modułują falę nośną fonii. Częstotliwość nośna fonii jest w polskim standardzie o 6,5 MHz większa niż częstotliwość nośna wizji. Zmodulowane sygnały: fonii (częstotliwościowo) i wizji (amplitudowo) są emitowane przez antenę nadawczą w postaci fal elektromagnetycznych i docierają do anten odbiorczych.

12.8.2. Synteza obrazu i dźwięku

Zadaniem odbiorczego układu syntezy obrazu i dźwięku jest takie przetworzenie sygnału wejściowego, aby obserwator otrzymał całą zawartą w nim informację. Sygnał wejściowy jest przebiegiem elektrycznym powstałym przez zsumowanie dwu sygnałów — całkowitego sygnału wizyjnego (CSW) i tzw. sygnału różnicowego fonii, otrzymanego w wyniku przetworzenia w demodulatorze AM sygnału częstotliwości pośredniej fonii. Na rysunku 12.18a przedstawiono widmo sygnału wejściowego dla tego układu. Zakres pasma do 6 MHz zajmuje sygnał CSW w swoim naturalnym pasmie, a zakres od 6,25 do 6,75 MHz zajmuje sygnał różnicowy fonii. Na rysunku 12.18b przedstawiono schemat funkcjonalny układu syntezy obrazu i dźwięku, składający się z toru wizji i toru fonii. Na wejściu każdego toru znajdują się filtry oddzielające sygnał CSW dla toru wizji i sygnał różnicowy fonii dla toru fonii. Omówimy oddzielnie oba te tory.

Zadaniem toru fonii jest **odtworzenie dźwięku** towarzyszącego obrazowi. Sygnał częstotliwości różnicowej fonii, po wydzieleniu w filtrze pasmowoprzestupowym (6,5 MHz), jest podawany na wzmacniacz p.cz. fonii, a następnie do demodulatora FM, na wyjściu którego uzyskuje się sygnał o częstotliwości akustycznej. Sygnał ten po wzmacnieniu we wzmacniaczu akustycznym wysterylizuje głośnik, który wytwarza drgania dźwiękowe. Zwróćmy uwagę, że schemat funkcjonalny toru fonii jest podobny do układu odbiornik radiowego o bezpośrednim odbiorze sygnału zmodulowanego częstotliwościowo (FM) o częstotliwości nośnej 6,5 MHz.



Rys. 12.18. Układ syntezy obrazu i dźwięku: a) widmo sygnału wejściowego; b) schemat funkcjonalny

Syntezę obrazu przeprowadza się w taki sam sposób jak jego analizę. Obraz odtwarza się, wyświetlając kolejno linię po linii danego półobrazu, co zachodzi w wyniku jednoczesnego modulowania jaskrawości plamki świetlnej na ekranie kineskopu oraz odchyłania jej w poziomie i w pionie. Modulację jaskrawości plamki uzyskuje się w wyniku sterowania wydajnością wyrzutni elektronów, za pomocą odpowiednio wzmocnionego sygnału wizji (w pewnym uproszczeniu).

Częstotliwość odchyłania poziomego w polskim standardzie wynosi 15 625 Hz, a pionowego 50 Hz. Zadaniem układów odchyłania poziomego i pionowego jest uzyskanie liniowego w funkcji czasu odchyłania plamki na ekranie, synfazowo z przychodzącymi impulsami synchronizacji. Taki efekt może być spowodowany tylko podobnym odchyłaniem strumienia elektronów, które

uzyskamy sterując cewki odchylające przebiegiem prądu zbliżonym do liniowego. Niewielkie korekty kształtu przebiegu prądu, dokonywane w praktycznych układach, mają na celu zapewnienie liniowego odchylania plamki. Amplituda przebiegu prądowego musi być tak dobrana, aby zapewnić właściwe rozmiary syntetyzowanego obrazu.

Znajdujący się w torze wizji filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej 6 MHz wydziela z sygnału wejściowego całkowity sygnał wizyjny. Po wzmocnieniu, sygnał ten steruje katodę kineskopu, modulując jaskrawość świecenia plamki.

Filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej około 100 kHz wydziela natomiast z sygnału wejściowego sygnał synchronizacji zawierający pozostałości sygnału wizyjnego. Impulsy synchronizujące pionowe (V) i poziome (H) sterują układ synchronizujący i odchylający ruch plamki świetlnej na ekranie kineskopu.

Pytania kontrolne:

1. Jakie znasz sposoby zapisu sygnału elektrycznego?
2. Jakie są podstawowe parametry wzmacniaczy? Podaj ich definicje.
3. Przedstaw różnice między wzmacniaczem idealnym a rzeczywistym.
4. Omów zasadę działania modulatora (na dowolnym przykładzie).
5. Na czym polega przemiana częstotliwości?
6. Co to jest demodulator i do czego służy?
7. Jak tworzy się obraz telewizyjny?
8. Omów procesy zachodzące w nadajniku i odbiorniku telewizyjnym.
9. Porównaj budowę i działanie odbiornika radiowego z bezpośrednim odbiorem i odbiornika superheterodynowego.

Słownik angielsko-polski

A

aberration — aberracja
 absorption — absorpcja
 accelerating electrode — elektroda przyspieszająca
 acceptor (atom) — atom akceptorowy
 access — dostęp
 acoustics — akustyka
 a.c. resistance — rezystancja dynamiczna
 active — czynny, aktywny
 adjustable — nastawny
 admittance — admitancja
 aerial — antena
 afterglow — poświata
 air — powietrze
 alphanumeric — alfanumeryczny
 a.c., alternating current — prąd przemieniczny
 amplification — wzmocnienie (sygnału)
 amplifier — wzmacniacz
 amplitude — amplituda
 analog — analogowy
 angle — kąt
 anode — anoda
 antenna — antena
 apparent power — moc elektryczna pozorna
 approximation (of characteristic curve) — aproksymacja (charakterystyki)
 atom — atom
 avalanche ionization — jonizacja lawinowa

B

backing — podłoże
 backward diode — dioda wsteczna
 band-elimination filter — filtr środkowozaporowy
 band-pass filter — filtr pasmowy, środkowo-przepustowy
 band-stop filter — filtr środkowozaporowy
 bandwidth — szerokość pasma
 barrier — bariera
 barrier layer — warstwa zaporowa
 base — baza (tranzystora)
 beam — wiązka promieniowania
 bias — polaryzacja, przesunięcie punktu pracy

bidirectional — dwukierunkowy
 bidirectional diode thyristor, diac — diak
 bilateral diode switch — tyrystor
 bilateral triode switch, triac — tyrystor symetryczny, triak
 binary — dwójkowy
 bipolar — bipolarny
 black-and-white television picture tube — kineskop czarno-biały
 blanking — wygaszanie
 blasting — przeciążenie (mikrofonu)
 blocking — blokowanie
 blocking capacitor — kondensator blokujący
 blocking layer — warstwa zaporowa
 breakdown — przebiecie
 breakover — przełączanie (tyrystora)
 brightness — jaskrawość
 broadband — szerokopasmowy
 bundle — wiązka; zwijka (kondensatora)

C

cable — kabel
 cable link — łącze kablowe
 capacitance — pojemność; reaktancja pojemnościowa
 capacitive reactance — reaktancja pojemnościowa
 capacitor — kondensator
 capacity — pojemność elektryczna
 carrier — nośnik
 carrier frequency — częstotliwość nośna
 carrier mobility — ruchliwość nośników ładunku
 carrier wave — fala nośna; przebieg nośny
 cathode — katoda
 cathode-ray tube — lampa obrazowa
 cathodoluminescence — elektronoluminescencja
 cell — ogniwo
 ceramic capacitor — kondensator ceramiczny
 channel — kanał; tor; łącze
 charge carriers — nośniki ładunku
 charge storage diode — dioda ładunkowa
 choke — dławik; cewka dławikowa
 chrominance channel — tor chrominancji

circuit — układ, obwód
 coaxial — współosiowy
 coefficient — współczynnik
 coil — cewka
 collector — kolektor (tranzystora)
 collector diode — złącze kolektorowe
 colour, color — barwa, kolor
 common-base connection — układ wspólnej bazy (WB, OB)
 common-emitter connection — układ wspólnego emitera (WE, OE)
 common-gate connection — układ wspólnej bramki
 complementary transistor pair — para komplementarna tranzystorów
 component — element (elektroniczny)
 concentric cable — kabel współosiowy
 condenser — kondensator
 condition — warunek
 conductance — konduktancja
 conducting direction — kierunek przewodzenia
 conduction — przewodnictwo
 conductivity — konduktywność
 conductor — przewodnik
 conductor track — ścieżka przewodząca
 contact (electric) — styk
 continuous signal — sygnał analogowy
 contrast (ratio) — kontrast (obrazu telewizyjnego)
 control electrode — elektroda sterująca
 core — rdzeń
 coupling — sprzężenie
 crest value — wartość szczytowa
 crystal — kryształ, rezonator kwarcowy
 current — prąd
 current amplification factor — współczynnik wzmocnienia prądowego
 cut-off — odcięcie, przerwanie (dopływu)
 cut-off frequency — częstotliwość graniczna
 cut-off region — obszar odcięcia
 cut-off voltage — napięcie odcięcia

D

dark current — prąd ciemny
 dark resistance — rezystancja ciemna
 decay time — czas opadania (impulsu)
 defect elektron — dziura elektronowa
 deflection — odchyłanie (wiązki elektro nowej)
 deflection yoke — zespół cewek odchylających
 delay line — linia opóźniająca

demodulation — demodulacja
 demodulator — demodulator
 density of carriers — koncentracja nośników ładunku
 density of impurities — koncentracja domieszek
 depletion layer — warstwa zubożona
 depth of modulation — głębokość modulacji
 detection — detekcja
 detector — detektor
 diac — diak
 dielectric — dielektryk
 dielectric loss angle — kąt strat dielektrycznych (tangens kąta stratności)
 dielectric loss factor — współczynnik strat dielektrycznych
 differential amplifier — wzmacniacz różnicowy
 differential resistance — rezystancja dynamiczna
 diffraction — dyfrakcja
 diffusion — dyfuzja
 digital — cyfrowy
 digital-circuit engineering — technika cyfrowa
 diode — dioda
 d.c., direct current — prąd stały
 directional microphone — mikrofon kierunkowy
 directional response pattern — charakterystyka kierunkowości (przetwornika elektroakustycznego)
 display matrix — wskaźnik półprzewodnikowy mozaikowy
 display segment — wskaźnik półprzewodnikowy segmentowy
 distorsion — zniekształcenie
 donor — atom donorowy, donor
 dopant — domieszka półprzewodnika
 doped semiconductor — półprzewodnik domieszkowany
 doping — domieszkowanie
 double-base diode — tranzystor jednozłazowy
 drain — dren (tranzystora polowego)
 drift — dryft
 duty — obciążenie; warunki pracy (urządzenia)

E

earphone — słuchawka
 earthing — uziemienie

effect — zjawisko
 effective current — skuteczna wartość prądu
 efficiency — sprawność
 electric field — pole elektryczne
 electric field strength — natężenie pola elektrycznego
 electrode — elektroda
 electroluminescence — elektroluminescencja
 electroluminescent display — wskaźnik elektroluminescencyjny
 electrolytic — elektrolityczny
 electromagnetic field — pole elektromagnetyczne
 electromagnetic wave — fala elektromagnetyczna
 electron gun — wyrzutnia elektronowa, działko elektronowe
 electron lens — soczewka elektronowa
 electron vacancy — dziura elektronowa
 electronvolt — elektronowolt, eV
 electron-hole pair — para elektron-dziura
 electronic — elektroniczny
 electronic engineer — elektronik
 electronics — elektronika
 electrostatic deflection — odchyłanie elektryczne
 electrostatic focusing — ogniskowanie elektryczne
 emission — emisja
 emitter — emiter tranzystora
 emitter junction — złącze emiterowe
 energy — energia
 enhancement (mode) transistor — tranzystor polowy z kanałem wzbogacanym
 Esaki diode — dioda tunelowa

F

fading — zanik sygnału
 fall — opadanie (zbrocza sygnału)
 family of characteristics — rodzina charakterystyk
 feedback — sprzężenie zwrotne
 feedback (control) loop — pętla sprzężenia zwrotnego
 Fermi energy — energia Fermiego
 fiber (fibre) — włókno (światłowodowe)
 field — pole
 field effect transistor, FET — tranzystor polowy
 filter — filtr
 fixed capacitor — kondensator stały
 fluorescence — fluorescencja

focusing — ogniskowanie
 forward bias — polaryzacja w kierunku przewodzenia
 frame — ramka; kadr
 frequency — częstotliwość
 frequency band — pasmo częstotliwości
 frequency changing — przemiana częstotliwości
 frequency characteristic — charakterystyka częstotliwościowa
 frequency modulation, FM — modulacja częstotliwościowa
 frequency multiplier — powielacz częstotliwości
 frequency-selective device — filtr (elektryczny)
 frequency range — zakres częstotliwości

G

gain — wzmocnienie (sygnału)
 gap factor — współczynnik modulacji
 gate — bramka elektroniczna; bramka tranzystora polowego
 generation — generacja (nośników ładunku)
 grid — siatka (lampy elektronowej)
 grid bias — napięcie polaryzacji siatki sterującej
 ground — uziemienie
 Gunn diode, Gunn oscillator — dioda Gunna

H

Hall-effect device, Hall generator — hallotron
 harmonic current — prąd sinusoidalny
 harmonic frequency — częstotliwość harmoniczna
 high-frequency amplifier — wzmacniacz wielkiej częstotliwości
 high-pass filter — filtr górnoprzepustowy
 hole (in a semiconductor) — dziura elektronowa
 hot carriers diode — dioda Schottky'ego

I

ignition coil — cewka indukcyjna
 illumination — natężenie oświetlenia
 image — obraz
 impact ionization — jonizacja zderzeniowa
 impedance — impedancja
 impedance coil — dławik
 impulse — impuls (elektryczny)
 impulse technique — technika impulsowa

impurity — domieszka (półprzewodnika)
 inductance — indukcyjność
 induction — indukcja
 induction coil — cewka indukcyjna
 input — wejście
 insulated gate field-effect transistor, IGFET
 — tranzystor polowy z izolowaną
 bramką
 intensity — natężenie
 interference — zakłócenia (sygnału)
 inverse current — prąd wsteczny
 ion — jon
 ionization — jonizacja
 irradiance — natężenie promieniowania

J

junction — złącze
 junction capacitance — pojemność złącza
 junction diode — dioda złączowa
 junction field-effect transistor, JFET —
 tranzystor polowy złączowy

K

kinescope — kineskop

L

lag — opóźnienie
 lead — wyprowadzenie; przewód
 leakage — wpływ (prądu)
 leakage current — prąd zerowy
 lifetime — czas życia (nośników)
 light — światło
 light activated silicon controlled rectifier —
 fototrystyor
 light-emitting diode, LED — dioda elektro-
 luminescencyjna
 light guide — światłowód, faliwódm optyczny
 light quantum — foton
 linear contact — kontakt omowy
 line of flux — linia siły pola magnetycz-
 nego
 line of force — linia siły pola elektrycz-
 nego
 liquid crystal — kryształ ciekły
 liquid crystal display, LCD — wskaźnik cie-
 kłokrystaliczny
 load, loading — obciążenie
 logic, logical — logiczny
 long line — linia długa
 loss — strata
 loss angle — kąt strat (dielektrycznych)
 loudspeaker — głośnik

low-pass filter — filtr dolnoprzepustowy
 low-stop filter — filtr górnoprzepustowy
 luminance — luminancja
 luminance channel — tor luminancji
 luminescence — luminescencja
 luminophor(e) — luminofor
 luminosity — jaskrawość

M

magnet — magnes
 magnetic field — pole magnetyczne
 magnetic flux — strumień magnetyczny
 magnetic flux density, magnetic induction —
 indukcja magnetyczna
 magnetoresistive effect, magnetoresistance
 — zjawisko Gaussa (zjawisko magneto-
 rezystywne)
 matching — dopasowanie
 matrix (unit) — matryca, mozaika
 mean life — średni czas życia
 membrane — membrana
 microelectronics — mikroelektronika
 microphone — mikrofon
 microwaves — mikrofałale
 microwave technique — technika mikrofa-
 lowa
 middle conductor, zero lead — przewód ze-
 rowy
 mid-range loudspeaker — głośnik średnioto-
 nowy
 mirror — zwierciadło
 mobility — ruchliwość (nośników ładunku)
 mode — mod (światłowodowy)
 modulation — modulacja
 modulation factor — głębokość modulacji
 modulator — modulator
 monochrome — monochromatyczny
 monocrystal — monokryształ
 multiple-emitter transistor-overlay — tran-
 zystor wieloemiterowy

N

negative charge — ładunek ujemny
 noise — szum
 nominal — znamionowy
 nonlinear — nieliniowy

O

offset — odstrojenie
 offset voltage — napięcie niezrównoważenia
 off-state — stan blokowania (trystora)
 on-state — stan przewodzenia (trystora)

operating point — punkt pracy
 operational amplifier — wzmacniacz operacyjny
 optical cable — kabel światłowodowy
 optical fiber — światłowód włóknisty
 optical fiber link — łącze światłowodowe
 optical waveguide — światłowód, falowód optyczny
 optically coupled isolator — transceptor
 optics — optyka
 optoelectronics — optoelektronika
 optoelectronik coupler — transceptor
 optoisolator — transceptor
 oscillation — drganie, oscylacja
 oscillator — generator drgań
 oscilloscope tube — lampa oscyloskopowa
 out of phase — przesunięty w fazie
 output — wyjście

P

parameter — parametr
 passive element — element bierny
 peak point — punkt szczytu
 peak-to-peak value — wartość międzyszczytowa
 percentage modulation — głębokość modulacji
 period — okres
 permanent magnet — magnes trwały
 permeability magnetic — przenikalność magnetyczna (materiału)
 permittivity — przenikalność elektryczna (materiału)
 persistence — poświata (ekranu luminescencyjnego)
 phase — faza
 phase deviation — dewiacja fazy
 phase change, phase displacement, phase shift — przesunięcie fazowe
 phosphor — luminofor
 phosphorescence — fosforescencja
 photocathode, photoelectric cathode — fotokatoda
 photocell, photoelectric cell — fotokomórka
 photoconductivity — fotoprzewodnictwo
 photocurrent — prąd fotoelektryczny
 photodiode — fotodioda
 photoeffect — zjawisko fotoelektryczne
 photoelectric — fotoelektryczny
 photoluminescence — fotoluminescencja
 photon — foton
 photoresistor — fotorezystor

photovoltaic cell, photoelement — fotoogniwo
 phototransistor — fototranzystor
 photothyristor — fototyristor
 picture — obraz
 picture signal — sygnał wizyjny
 picture tube — kineskop, lampa obrazowa
 pinch-off — odcięcie (kanału w tranzystorze)
 pinch-off voltage — napięcie odcięcia kanału
 point-contact diode — dioda ostrzowa
 polarity — biegunowość
 polarization — polaryzacja
 polycrystal — polikryształ
 positive — dodatni
 potential — potencjał
 potential difference — napięcie elektryczne, różnica potencjałów
 potential source — źródło napięcia
 potentiometer — potencjometr, rezystor obrotowy
 power — moc
 primary — pierwotny, podstawowy
 primary cell — ogniwo elektryczne
 propagation — propagacja
 pulse — impuls
 pulse generator — generator impulsowy, impulsator
 pulse leading edge — zbocze przednie impulsu
 pulse trailing edge — zbocze tylne impulsu

Q

Q-factor of a coil — dobroć cewki
 quality factor — współczynnik dobroci
 quarter-wave length line — linia ćwierćfalowa

R

radiation — promieniowanie
 range — zakres, przedział
 reactance — reaktancja
 reactive power — moc elektryczna bierna
 real power — moc elektryczna czynna
 reception — odbiór
 recombination — rekombinacja
 rectification — prostowanie (prądu)
 rectifier diode — dioda prostownicza
 reference voltage — napięcie odniesienia
 reflection — odbicie
 region — obszar

regulator — stabilizator
 remote control — sterowanie zdalne (urządzeń)
 resistance — rezystancja
 resistor — rezystor
 resistivity — rezystywność
 resolution — zdolność rozdzielcza
 resonance — rezonans
 reverse bias — polaryzacja w kierunku zapo-
 rowym
 rise time — czas narastania
 root-mean-square value — wartość skuteczna
 wielkości okresowej

S

sample — próbka
 saturation — nasycenie
 sawtooth pulse — impuls piłokształtny
 scanning (in reception) — synteza obrazu
 scanning system — tor synchronizacji i od-
 chylania
 screen — ekran
 screening — ekranowanie
 secondary — wtórny
 selective — selektywny
 self-excited oscillator — generator samo-
 wzbudny
 self-induction — indukcja własna
 semiconductor — półprzewodnik
 sender — nadajnik
 sensitivity — czułość
 series — szeregowy
 setting — nastawianie
 set-up time — czas ustalania
 short-circuit, shorting — zwarcie
 signal — sygnał
 single crystal, monocrystal — monokryształ
 snap-off diode — dioda ładunkowa
 soldering — lutowanie
 sound — dźwięk
 sound channel — tor foniczny (w odbiorni-
 ku telewizyjnym)
 source — źródło
 spectrum — widmo
 spectrum analyser — analizator widma
 square-wave generator — generator przebie-
 gów prostokątnych
 stabilization — stabilizacja
 static — statyczny
 steady state — stan ustalony

step-recovery diode — dioda ładunkowa
 stopping capacitor — kondensator bloku-
 jący
 storage time — czas magazynowania (w złą-
 czu PN)
 subwoofer — głośnik niskotonowy
 supply voltage — napięcie zasilania
 susceptance — susceptancja
 switching — przełączenie, wyłączenie
 switching diode — dioda impulsowa
 synchronization — synchronizacja

T

temperature — temperatura
 thermistor, temperature-sensitive resistor —
 termistor NTC
 threshold — próg
 thyristor — tyrystor
 timbre — barwa dźwięku
 time — czas
 trace — linia (w lampie obrazowej)
 track — trzymać, śledzić
 transadmittance — transadmitancja
 transconductance — transkonduktancja
 transistor — tranzystor
 transition frequency — częstotliwość grani-
 czna
 transmittance — transmitancja
 triac — triak
 triangular-wave oscillator — generator prze-
 biegów trójkątnych
 trimmer capacitor — kondensator dostrojczy,
 trymer
 tuned amplifier — wzmacniacz rezonan-
 sowy
 tunnel diode — dioda tunelowa
 turn-on voltage — napięcie progowe (włą-
 czania)
 tweeter — głośnik wysokotonowy

U

unijunction transistor — tranzystor jedno-
 złączowy
 unipolar transistor — tranzystor unipolarny

V

valence band — pasmo podstawowe, pasmo
 walencyjne
 valley current — prąd doliny

variable capacitance diode — dioda pojemnościowa, warikap
 variable capacitor — kondensator nastawny
 variable resistor — rezystor nastawny, wari-
 stor
 varicap — dioda pojemnościowa
 varactor — waraktor
 varistor, voltage-dependent resistor — wari-
 stor, rezystor sterowany napięciowo
 vibrations — oscylacje, drgania
 video amplifier — wzmacniacz wizyjny
 video carrier — (częstotliwość) nośna
 wizji
 voltage — napięcie (elektryczne)
 voltage-regulator diode — dioda stabilizująca napięcie

W

wafer — płytka półprzewodnikowa
 watt-hour efficiency — sprawność energetyczna
 wattless power — moc elektryczna bierna
 wave — fala, przebieg
 wavelength — długość fali
 wide-band — szerokopasmowy
 winding — uzwojenie
 woofer — głośnik niskotonowy
 working point — punkt pracy

Z

Zener breakdown — przebicie Zenera (złącza PN)
 zone — strefa, obszar

Skorowidz

- aberracja sferyczna 40
- chromatyczna 40
- admitancja wyjściowa 102
- akcelerator cząstek naładowanych 38
- analizator prędkości 38
- anizotropia 40
- anoda 46, 78, 117
- antena 161, 166
- nadawcza 161, 166
- astygmatyzm 40, 44
- bariera energetyczna 66, 137
- baza 92, 117
- bel 24
- błąd asymetrii układu odchylającego 44
- odchylenia układu odchylającego 44
- odwzorowania 40, 43
- obrazu 40
- bramka 118
- całkowite odbicie 33
- całkowity sygnał wizyjny 168
- cewka 20
- bezrdzeniowa 20
- cylindryczna 20
- drukowana 20
- ekranowa 20
- jednowarstwowa 20
- kwadratowa 21
- nieekranowana 20
- płaska 20
- rdzeniowa 20
- spiralna 21
- toroidalna 20
- wielowarstwowa 20
- charakterystyka
- częstotliwościowa 131
- czułości widmowej 136, 139
- kątowa promieniowania 131
- kierunkowa 29
- napięciowo-prądowa 62, 82, 115, 138
- oddziaływania pola magnetycznego 65
- oddziaływania prądu sterującego 65
- przejściowa 96, 123, 126
- przenoszenia 25
- spektralna 45
- statyczna 64, 96, 97
- wejściowa 96, 97
- widmowa 131
- wyjściowa 64, 96, 123, 126
- zwrotna 96, 97
- ciekły kryształ 141
- ciśnienie akustyczne 25
- czas przelotu nośników 75, 94
- przełączania 89
- ustalania prądu wstecznego 82, 87
- włączania 75, 120
- wyłączania 75, 108, 120
- życia nośnika 52, 73, 131
- — nośników mniejszościowych 94
- częstotliwość dolna 149
- górna 149
- graniczna 78, 104, 108, 124, 127, 131, 149
- heterodyny 165
- maksymalna 86
- nośna 157, 163, 166, 168
- pośrednia 153, 165
- rezonansu własnego 22
- środkowa 153, 165
- czułość odchylania 43
- połowa 65
- prądowa 65, 88
- widmowa 133, 138
- czujnik Halla 63
- defekty sieci krystalicznej 52, 134
- demodulacja 154, 158
- demodulator 158, 161, 165, 166
- dewiacja częstotliwości 157
- fazy 158
- diak 114, 118
- dioda detekcyjna 78, 88
- dużej mocy 82
- dyfuzyjna 78
- elektroluminescencyjna 129
- epiplanarna 78
- generacyjna 89
- germanowa 78
- Gunna 78, 90
- impulsowa 78, 87
- krzemowa 78
- lawinowa 78, 90
- ładunkowa 87
- małej mocy 82
- mesa 78
- mieszająca 78, 88
- mikrofalowa 78
- modulacyjna 90
- ostrzowa 78, 87, 88, 89
- PIN 78, 90
- planarna 78
- pojemnościowa (warikap) 78, 85

- dioda półprzewodnikowa 78
 - prostownicza 78, 82
 - przełączająca 87
 - Schottky'ego 87, 88, 89
 - stabilizacyjna 84
 - stopowa 78
 - średniej mocy 82
 - świecąca 132, 139
 - tłumiąca 90
 - tunelowa 78, 87
 - uniwersalna 78
 - warstwowa 78
 - wsteczna 88
 - wzmacniająca 89
 - Zenera 78
 - zwrotna 89
- dipol 141
- dławik 21, 22
- długość fali promieniowania 129, 134, 136
- dno pasma przewodnictwa 53
- dobroć 21, 86
- domieszka 52, 131
 - akceptorowa 53
 - donorowa 53
- dopasowanie impedancji 33
- droga dyfuzji 56
 - swobodna 56
- dyfrakcja 40
- dyfuzja 56, 66
- dynistor 114, 116
 - symetryczny 118
- dystorsja 44
 - beczkowata 44
 - poduszkowata 44
- dziura 51
- efekt Earle'go (patrz zjawiska Earle'go)
 - Gunna 90
- ekran matowy 22
- elektroluminescencja 44
- elektronowolt 51
- element przełączający 114
- emiter 92, 117
- energia świetlna 44
- filtr pasmowoprzepustowy 149, 161, 163, 166
- fluorescencja 45
- fosforescencja 44
- fotodetektor 132
- fotodioda 132, 134, 138
- fotokatoda 132
- fotoluminescencja 45
- fotoogniwo 132, 134, 138
- fotorezystor 132, 133
- fototranzystor 132, 137
 - z wyprowadzoną końcówką bazy 138
- fototyristor 132, 139
- funkcja przenoszenia 147
- gaussotron 65
- generacja pary elektron-dziura 52
- generator 152
 - Halla 63
 - impulsowy 152
 - przebiegu liniowego 152
 - — — piłokształtnego 152
 - — — trójkątnego 152
 - — — prostokątnego 152
 - sinusoidalny 152
 - sterowany 153
 - synchronizowany 152
 - wyzwalany 152
- głośnik 24, 161
 - dynamiczny 24
 - niskotonowy 25
 - otwarty 25
 - standardowy 25
 - szerokopasmowy 25
 - średniotonowy 25
 - tubowy 25
 - ultrawysokotonowy 25
 - wysokotonowy 25
- hallotron 63
- heterozłącze 66
- heterodyna 153, 164
- homozłącze 66
- impedancja falowa 32
 - wejściowa 102
 - wyjściowa 29
 - znamionowa 25
- indukcyjność
 - jednostkowa 32
 - własna 21
- jaskrawość 48
 - elektronowa 43
- jonizacja zderzeniowa 71
- kanal indukowany 125
 - wbudowany 125
- katoda 46, 78, 117
- kąt graniczny 33
 - Halla 59
 - krytyczny 33
 - odbicia 33
 - odchyłania 49
 - padania 33
- kierunkowość mikrofonu 29

- kineskop 46, 166
- typu Δ 47
- typu IL 47
- typu PIL 47
- typu trynitron 47
- klasa dokładności 13
- kod barwny 14
- literowo-cyfrowy 14
- kolektor 92, 117
- koma 40, 44
- koncentracja 52
- samoistna 52
- kondensator 11, 16
- biegunowy 17, 18
- ceramiczny 17, 19
- elektrolityczny 17
- — aluminiowy 18
- — tantalowy 18
- impulsowy 16
- mikowy 17
- niebiegunowy 17, 18
- o logarytmicznej zmianie pojemności 20
- o prostoliniowej zmianie częstotliwości 20
- o prostoliniowej zmianie długości fali 19
- o prostoliniowej zmianie pojemności 19
- o zmiennej pojemności 17, 19
- obrotowy 20
- papierowy 17
- poliestrowy 18
- polipropylenowy 18
- polistyrenowy 18
- powietrzny 17, 19
- stałonapięciowy 16
- z dielektrykiem powietrznym 19
- z tworzyw sztucznych 17
- zmiennonapięciowy 16
- konduktancja różniczkowa złącza 74
- wejściowa 101
- wyjściowa 101
- konduktywność 56
- kontrast 48, 142, 143
- kwant promieniowania elektromagnetycznego 52
- lampa elektronopromieniowa 38
- oscyloskopowa 45
- pamiętająca 46
- wielostrumieniowa 46
- z rozdzielnym strumieniem 46
- lawinowa jonizacja zderzeniowa 71
- linia długa 31
- ćwierćfalowa 33
- koncentryczna (współosiowa) 31
- półfalowa 33
- symetryczna 31
- liniowość odchyłania 43
- luminofor 44, 46
- łącze optoelektroniczne 132
- magnetorezystor 11, 65
- maksymalna częstotliwość 86, 124
- — generacji 105, 108, 124
- — pracy 46
- moc 108
- — strat 85
- maksymalny kąt obserwacji 141
- maskownica 47
- materiał półprzewodnikowy 51
- membrana 25, 29
- o kształcie czaszy kulistej 25
- — płaskim 25
- — stożkowym 25
- — wykładniczym 25
- memotron 46
- mieszacz 153, 164
- mikrofon 24, 29, 161
- bezprzewodowy 30
- ciśnieniowy 29
- dynamiczny 29
- gradientowy 29
- magnetoelektryczny 29
- piezoelektryczny 29
- pojemnościowy 30
- przewodowy 30
- węglowy 29
- moc emitowana 131
- strat 131
- znamionowa 14, 25, 63
- mod światłowodowy 34
- model Ebersa-Molla 103
- pasmowy 53
- modulacja 154, 158
- amplitudy 154
- częstotliwości 154, 157
- fazy 155, 157
- rezystancji kanału 126
- szerokości bazy 97
- modulator 154, 161, 166
- monokryształ 51
- napięcie dyfuzyjne 66
- charakterystyczne 63
- nasycenia 104, 108, 116, 122, 126
- odcięcia 125, 126
- progowe 125, 126
- przebicia 70, 99

- napięcie przełączania 120
- przewodzenia 82, 84, 131
- stabilizacji 84
- wsteczne 82, 131, 134
- znamionowe 17
- natężenie oświetlenia 133
- promieniowania 130
- nieskompensowany ładunek 137
- nośnik swobodny 51
- mniejszościowy 54, 68, 69, 93
- większościowy 54, 66, 68, 69, 93
- obraz 39, 166
- obszar pracy aktywnej 99
- przyłączowy 67
- odbiornik fotoelektryczny 132
- superheterodynowy 164
- odcięcie kanału 122, 126
- odcinkowo-liniowe modele tranzystora 103
- oddziaływanie wsteczne 97
- para nadmiarowa 56
- elektron-dziura 52, 68, 69
- parametry charakterystyczne 98
- dynamiczne 99
- graniczne 98
- maksymalne 99
- statyczne 98
- pasmo użytkowe głośnika 25
- podstawowe 52
- przenoszenia 105
- przewodnictwa 52
- zabronione 51, 52
- plytki odchylające 43
- — łamane 43
- — płaskorównoległe 43
- — profilowane 43
- — ukośne 43
- polaryzacja złącza 67, 93
- — w kierunku przewodzenia 67, 129
- — w kierunku zaporowym 68, 84, 85, 137
- pole wzmocnienia 104
- połówkowa szerokość spektralna promienio-
wania 131
- pojemność diody 87
- dyfuzyjna 73, 101
- jednostkowa 32
- sprzęgająca 17
- warstwy zaporowej 74
- własna 21
- złącza 86, 99, 101, 134
- znamionowa 17
- poświata 44
- potencjometr 11, 15
- drutowy 15
- o charakterystyce liniowej 15
- o charakterystyce logarytmicznej 15
- o charakterystyce wykładniczej 15
- warstwowy 15
- powierzchnia światłoczuła 134
- poziom akceptorowy 54
- donorowy 53
- półprzewodnik 50
- akceptorowy 54
- bipolarny 58
- domieszkowany 53
- niesamoistny 53
- samoistny 52
- silnie domieszkowany 54
- typu N 53
- typu P 54
- unipolarny 58
- półprzewodnikowy wskaźnik cyfrowy (patrz
wskaźnik cyfrowy) 139
- prawo załamania 39
- prąd ciemny 133, 137, 138
- dyfuzyjny 56, 68, 69
- fotoelektryczny 133, 135, 137, 138
- nasycenia diody 81
- — drenu 124, 126
- — złącza 70
- płynący przez złącze 69
- przełączający bramki 120
- przewodzenia 131
- stabilizacji 84
- termokinetyczny 58, 66, 68, 69
- trzymania 120
- unoszenia 56, 67, 69
- upływowy 17
- wsteczny 82, 84, 86, 87
- zerowy 94, 108
- — kolektora 94
- zwarcia 135
- promień elektronu 39
- przebiecie lawinowe 100
- skrośne 100
- wtórne 100
- Zenera 99
- złącza 70
- przecinkowość 40
- przejście tunelowe 70, 72
- przełączanie diody 75
- dynistora 118
- tranzystora 106
- triaka 119
- tyrystora 119
- przemiana częstotliwości 153

- przetwornik dynamiczny 24
- elektroakustyczny 24
- elektromagnetyczny 24
- piezoelektryczny 24
- pojemnościowy 24
- węglowy 24
- pulsacja graniczna 104
- punkt doliny 88
- szczytu 87
- rekombinacja 52, 93, 129
- promienista 52, 129
- pary elektron-dziura 52
- rezonans mechaniczny 25
- rezystancja 11
- bazy 98, 100
- ciemna 134
- dynamiczna 84, 88
- jednostkowa 32
- kanału 124
- międzybazowa 116
- nominalna 62
- obciążenia 136
- szeregową 86
- termiczna 134
- ujemna 88
- wejściowa 95
- wyjściowa 95
- znamionowa 13
- rezystor 11
- cienkowarstwowy 12
- dokładny 13
- drutowy 12
- grubowarstwowy 12
- liniowy 11, 13
- metalizowany 12
- niedrutowy 12
- nieliniowy 13
- objętościowy 13
- regulowany 90
- warstwowy 12
- węglowy 13
- zmienny 11, 15
- rezystywność 58, 74
- półprzewodnika 59
- rotor 19
- rozdzielczość 48
- rozogniskowanie wiązki 44
- rozproszenie 142
- ruchliwość nośnika 56
- schemat zastępczy diody 78, 81
- — tranzystora 100
- — — hybrydowy 100, 102
- — — Ebersa-Molla 100, 103
- — — typu II 100
- sieć krystaliczna 51
- — defekty 52
- siła elektromotoryczna fotoelektryczna 135
- składowa harmoniczna 147
- składowa stała 147
- zmienna 147
- skręcenie obrazu 40
- skuteczność mikrofonu 29
- sluchawka 24, 28
- elektromagnetyczna 28
- elektrostatyczna 28
- dynamiczna 28
- soczewka elektronowa 38, 41
- katodowa 42
- kwadrupolowa 42
- immersyjna 41
- oktupolowa 42
- przesłonowa 42
- symetryczna 42, 43
- sprawność detekcji 88
- emisji promieniowania 130
- energetyczna 135
- kwantowa zewnętrzna 131
- stabilizator 78
- stan aktywny 98, 104
- blokowania 115, 117, 139
- inwersyjny 98
- nasycenia 98, 104, 126
- nieprzewodzenia 115
- pracy tranzystora 98
- przewodzenia 115, 117, 139
- włączenia 115
- wyłączenia 115
- zaporowy 117
- zatkania 98, 118
- stator 19
- struktura kryształu 141
- cholesterolowa 141
- nematyczna 141
- smektyczna 141
- strumień energetyczny 130
- sygnał analogowy 146
- cyfrowy 146
- elektryczny 146
- fonii 168
- luminancji 168
- nośny 155, 156, 157
- synchronizacji 168
- wejściowy 147
- wyjściowy 147, 156

- sygnał użyteczny 156, 157, 158
- zmodulowany amplitudowo 154, 158
- sygnał zmodulowany częstotliwościowo 157
- — fazowo 157
- synteza obrazu 169
- szeregi wartości rezystancji znamionowych 13
- szerokość pasma zabronionego 129
- warstwy zaporowej 67, 71
- światłość 130
- światłowod 33, 132
- jednomodowy 34
- jednowłóknowy 33, 36
- wiązkowy 33, 36
- wielomodowy 34
- tangens kąta stratności 17
- temperaturowy współczynnik napięcia stabilizacji 84
- — pojemności 17
- — rezystancji 51, 62
- termistor 11, 61
- o dodatnim współczynniku temperaturowym rezystancji (PTC) 61
- o skokowej zmianie rezystancji (CTR) 61
- o ujemnym współczynniku temperaturowym rezystancji (NTC) 61
- tłumienie światłowodu 35
- tolerancja rezystancji 13
- tor elektronu 38
- fonii 168
- transkonduktancja 101, 127
- transmisja 160
- obrazu 165
- transoptor 132
- otwarty 132
- zamknięty 132
- tranzystor 91, 137
- bipolarny 91
- dryftowy 91
- dyfuzyjny 91
- dużej mocy 92, 109
- jednozłączowy 114, 115
- małej częstotliwości 92, 109
- małej mocy 92, 109
- normalnie wyłączony 92
- normalnie załączony 92
- polowy 91, 121
- średniej mocy 92, 109
- unipolarny 91, 121
- wielkiej częstotliwości 92, 109
- z izolowaną bramką 91, 121, 125
- z jednorodną bazą 91, 94
- z kanałem wzbogacanym 92, 121
- — zubożanym 92, 121
- z niejednorodną bazą 91, 94
- złączowy 91, 121
- tranzystory komplementarne 112
- triak 114, 119
- trwałość diod elektroluminescencyjnych 131
- trymer 19, 20
- tyrystor 114, 118
- symetryczny 119
- ujemna rezystancja dynamiczna 72
- układ odchylający 38, 43
- elektronooptyczny 38
- ze wspólną bazą 95
- ze wspólnym emiterem 95
- ze wspólnym kolektorem 95
- upływność jednostkowa 32
- urządzenie elektronowiążkowe 38
- waraktor 78, 85
- warikap 78, 85
- warystor 11, 62
- warstwa akumulacyjna 125
- inwersyjna 125
- zaporowa 67
- zubożona 67, 125
- wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne 132
- wewnętrzny współczynnik blokowania 115
- wiązka elektronowa 39, 43
- widmo częstotliwości 147, 156
- dyskretne 147
- prążkowe 147
- widmowy zakres pracy 134
- wierzchołek pasma podstawowego 54
- włączanie tranzystora 107
- włókno szklane 33
- wskaźnik ciekłokrystaliczny 141
- — z efektem polowym 143
- — z rozproszeniem dynamicznym 143
- cyfrowy 139
- — alfanumeryczny 140
- — hybrydowy 139
- — światłowodowy 140
- — monolityczny 140
- — mozaikowy 140
- — segmentowy 140
- optyczny 132
- współczynnik dyfuzji 56
- głębokości modulacji 156
- Halla 59
- nieliniowości 62
- odchylania 46
- powielania lawinowego 71
- przenoszenia 32
- — prądowego 102
- — wstecznego 102

- współczynnik przesunięcia 32
- temperaturowy rezystancji 62
- tłumienia 32
- wewnętrzny blokowania 116
- wzmocnienia prądowego 103
- załamania 39
- wyłączanie tranzystora 107
- wyrzutnia elektronowa 38, 42, 43, 45, 47
- wzór Einsteina 56
- wzmacniacz 149, 161
 - m.cz. 149
 - operacyjny 152
 - różnicowy 151
 - selektywny 151
 - stałoprądowy 151
 - szerokopasmowy 151
 - w.cz. 151, 166
- wzmocnienie 149
 - napięciowe 95, 149
 - mocy 95
 - prądowe 93, 95, 108, 149
- zakres barw 48
 - pracy liniowy 123
 - pracy nasycenia 123
 - przetwarzanych częstotliwości 25, 29
- zakrzywienie pola 44
- zamknięcie (odcięcie) kanału 122
- zespół głośnikowy 26
 - dwudrożny 26
 - trójdrożny 26
 - w obudowie otwartej 26
 - w obudowie zamkniętej 26
- zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne 132
- złącze 66
 - emiterowe 92
 - kolektorowe 92
 - PN 66, 75, 92, 103, 134
- zjawisko Early'ego 97, 101
 - elektroluminescencyjne 129
 - Gaussa 59, 65
 - Halla 59, 63
 - lawinowe 70, 84, 90
 - tunelowe 72, 87
 - Zenera 70, 84, 89
- zwierciadło elektronowe 42
- źródło energii 38
 - prądu 137
 - promieniowania niewidzialnego 129
 - promieniowania widzialnego 129
 - zasilania 136

Literatura

1. Braclawski K., Siennicki A.: *Elementy półprzewodnikowe*. WSiP. Warszawa 1988 r.
2. *Encyklopedia Elektroniki*. WNT. Warszawa 1983 r.
3. Filipkowski A.: *Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe*. WNT. Warszawa 1980 r.
4. Kania J.: *Kineskopy kolorowe i ich zespoły*. WKiŁ. Warszawa 1988 r.
5. Kulka Z., Nadachowski M.: *Analogowe układy scalone*. WKiŁ. Warszawa 1980 r.
6. Marciniak W.: *Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone*. WNT. Warszawa 1984 r.
7. Marusak A.: *Urządzenia elektroniki*. WSiP. Warszawa 1987 r.
8. Masewicz T.: *Radioelektronika dla praktyków*. Warszawa 1986 r.
9. Nowakowski W.: *Podstawowe układy elektroniczne. Układy impulsowe*. WKiŁ. Warszawa 1982 r.
10. *Optyka elektronowa*. Praca zbiorowa. WKiŁ. Warszawa 1984 r.
11. Pawlaczyk A.: *Elementy i układy optoelektroniczne*. WKiŁ. Warszawa 1984 r.
12. *Poradnik radiotechnika*.
13. Rydzewski J.: *Oscyloskop elektroniczny*. WKiŁ. Warszawa 1982 r.
14. Sosiński B.: *Poradnik warsztatowy. Naprawa kalkulatorów i zegarków elektronicznych*. WNT. Warszawa 1984 r.
15. Świt A., Półtorak J.: *Przyrządy półprzewodnikowe*. WNT. Warszawa 1979 r.
16. Urbański B.: *Elektroakustyka*. WSiP. Warszawa 1977 r.
17. Witort A.: *Głośniki i zespoły głośnikowe*. WKiŁ. Warszawa 1977 r.



WSiP

Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna



Krzysztof Sacha

Komputer w szkole i w domu



Grzegorz Płoszajski

Elementy informatyki użytkowanie komputera



Andrzej Rydzewski

Ilustrowany słownik techniki komputerowej

ISBN 83-02-06181-6



9 788302 061813

05

