

nazivnih veličina obično su standardizirani. Najveće dozvoljeno odstupanje ΔA od nazivne vrijednosti A zove se tolerancija. Ona se obično izražava relativno, u postocima:

$$\text{tolerancija} = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%.$$

Nazivna vrijednost i tolerancija označene su obično na sastavnom dijelu. Stvarna vrijednost karakteristične fizikalne veličine sastavnog dijela mijenja se u toku vremena i rada u ovisnosti o pogonskim i drugim uvjetima. Vremenska promjena te vrijednosti izražava se kao relativno odstupanje u odnosu prema početnoj vrijednosti, obično u postocima za određeni period vremena. Što je to relativno odstupanje manje to je *stabilnost* karakteristične veličine sastavnog dijela veća.

PASIVNI ELEKTRONIČKI SASTAVNI DIJELOVI

U ovu grupu ulaze otpornici, kondenzatori, svici (zavojnice), transformatori i dijelovi kojima je karakteristika da mogu mijenjati magnetski tok.

Parazitne veličine. Svaki pasivni sastavni dio, osim svojstva karakterističnog za vrstu kojoj pripada, ima u vrlo maloj mjeri i svojstva drugih vrsta sastavnih dijelova. Tako, npr., svaki otpornik osim otpora ima i izvjesnu induktivnost (koja je ponekad zanemarljivo mala, a ponekad i nije) i izvjestan kapacitet, kao što je to s pomoću nadomjesne sheme prikazano na sl. 1. Fizikalne veličine kao svojstva sastavnog dijela jedne vrste, koje su karakteristične veličine sastavnog dijela druge vrste, zovu se parazitne veličine. Parazitne veličine svih vrsta sastavnih dijelova nastoje se svesti na što manje vrijednosti, jer one nepovoljno utječu na mogućnost primjene elemenata pod različitim uvjetima rada. Tako se, npr., otpornik sa sl. 1, ako su mu induktivnost L i kapacitet C relativno veliki, ne može jednako dobro primjenjivati na niskim i na visokim frekvencijama. Na sl. 1 prikazane su parazitne veličine kao koncentrirane, iako su one u stvari raspodijeljene duž cijelog otpornika. Pri vrlo visokim frekvencijama takav približni prikaz nije dovoljno tačan, već se mora uzeti u obzir i raspodijeljenost parazitnih veličina, uslijed čega element predstavlja cijeli niz koncentriranih otpornika, kondenzatora i induktiviteta, analogan električnomvodu.

Otpornici

Otpornik je sastavni dio električnog kruga koji predstavlja omski (aktivni, radni ili djelatni) otpor određene vrijednosti, koja se promjenom električnih, mehaničkih i temperaturnih uvjeta rada mijenja samo u granicama tolerancija. Stvarna vrijednost omskog otpora R otpornika je omjer napona U i struje I koja teče kroz otpornik pri određenoj temperaturi, vlažnosti i atmosferskom pritisku okoline, $R = U/I$. Ova vrijednost mijenja se s promjenama napona i frekvencije struje.

Karakteristične veličine otpornika. Ovisnost otpora otpornika o temperaturi izražava se pomoću *temperaturnog koeficijenta otpora* α , koji je za neke otporne materijale pozitivan (tj. otpor se s porastom temperature povećava), a za druge je negativan. Koeficijent α je relativna promjena otpora R po jedinici razlike temperature θ : $\alpha = \frac{\Delta R}{R \Delta \theta}$, a izražava se obično u $\% / ^\circ\text{C}$ ili $10^{-4} / ^\circ\text{C}$.

Ovisnost otpora otpornika o narinutom naponu izražava se pomoću *naponskog koeficijenta otpora*, koji daje relativnu promjenu otpora po jedinici napona, obično u procentima; izražava se u $\% / \text{V}$. U otpornike ubrajaju se i neki pasivni elektronički sastavni dijelovi (termistori i varistori) kojima je karakteristično svojstvo da imaju velik naponski ili temperaturni koeficijent otpora, za razliku od običnih otpornika, kod kojih se nastoji da taj temperaturni koeficijent bude što manji.

Frekvencijska ovisnost otpornika uzrokovana je parazitnim veličinama prikazanim u koncentriranom obliku na paralelnom nadomjesnom krugu na sl. 1. Otpor R na sl. 1 je otpor koji će otpornik predstavljati za istosmjernu struju ili za struje niskih frekvencija. U području viših frekvencija utjecaj parazitnog kapaciteta C i parazitne induktivnosti L nije više zanemarljiv. Impe-

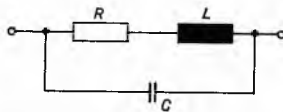
dancija takva otpornika može se pri višim frekvencijama izraziti pomoću efektivnog otpora R' i efektivnog induktiviteta L' . Komplicirani izrazi za te veličine mogu se uz pretpostavku da su L i C relativno mali i da je $\omega^2 LC \ll 1$ pojednostavniti i pisati

$$R' \approx R [1 - \omega^2 C (2L - CR^2)] \quad \text{i} \quad L' = L - CR^2.$$

U tom je slučaju

$$\tan \varphi = \frac{\omega L'}{R} = \frac{\omega (L - CR^2)}{R}.$$

Što je razlika $L/R - CR$ manja to je fazni kut φ manji i manje ovisan o frekvenciji. Prema tome, da bi vrijednost otpora bila što neovisnija o frekvenciji i fazni kut što manji, iznosi CR i L/R treba da budu mali i što bliži jedan drugome; to se može postići pogodnom konstrukcijom. Efektivni otpor R' jednak je otporu R pri istosmjernoj struji samo ako je $2L - CR^2 = 0$ ili ako je $C = 0$.



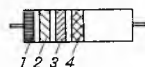
Sl. 1. Nadomjesni sklop otpornika prikazan pomoću koncentriranih parazitnih elemenata

Opteretljivost otpornika. Pri prolazu struje kroz otpornik u njemu se električna energija pretvara u toplinu. Kolika se količina električne energije smije potrošiti u otporniku bez njegova oštećenja ovisi o njegovoj opteretljivosti. Ona se definira snagom koju otpornik može disipirati ako je okružen zrakom određene temperature. (Redovito se izražava u vatima na temperaturi 25°C). Prekoračenje snage dane opteretljivošću izaziva pretjerano zagrijavanje pojedinih dijelova otpornika i dovodi do njegova oštećenja.

Šum otpornika. Svaki otpornik predstavlja i izvor električnog šuma, koji može biti uzrokovan termičkom vibracijom elektrona (termalni šum), protokom struje kroz nehomogeni materijal ili nedovoljno stabilnim kontaktima između dva različita otporna materijala. Termalni je šum proporcionalan apsolutnoj temperaturi na kojoj se nalazi otpornik i vrijednosti njegova otpora, a ostale su vrste šuma u otporniku ovisne o naponu na njemu. (V. poglavlje Šum u članku *Elektronika, uređaji*.)

Tzv. vlastiti šum otpornika izražava se (prema standardu DIN) omjerom između napona šuma, u μV , što ga taj otpornik daje kad mu se narinu napon, na 20°C , i tog narinutog napona u voltima ($\mu\text{V/V}$).

Označavanje otpornika. Prema veličini njihova temperaturnog koeficijenta, otpornici su standardima podijeljeni u klase. Standardizirane su i nominalne vrijednosti otpora za otpornike određenih tolerancija. Otpornik se označava ispisivanjem nominalne vrijednosti otpora u omima na njemu ili nanošenjem četiriju različito obojenih traka (sl. 2), od kojih prve tri prikazuju vrijednost otpora, a četvrta toleranciju. Prva boja znači prvu brojku, druga drugu brojku, a treća množitelj. Značenje boja za znamenke, decimalni množitelj i tolerancije prikazano je u tabl. 1.



Sl. 2. Označavanje vrijednosti otpornika pomoću obojenih područja. 1 Prva znamenka, 2 druga znamenka, 3 decimalni množitelj, 4 tolerancija

Podjela otpornika. Otpornici se izrađuju od tri vrste materijala i prema tome se razlikuju slojni, maseni i žičani otpornici. **Slojni otpornici** napravljeni su od tankog sloja homogenog otpornog materijala, koji je nanesen na tijelo od izolatora. Otporni materijal **masenih otpornika** je smjesa vodljivog materijala i izolatora, koja ujedno čini tijelo otpornika. **Žičani otpornici** izrađuju se od otporne žice namotane na izolator.

Otpornici kojima se stvarna vrijednost otpora neznatno mijenja pod različitim radnim uvjetima i ne može se podešavati nakon

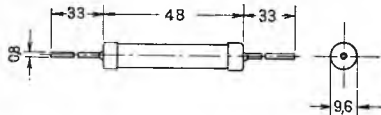
Tablica 1
ZNAČENJE BOJA UPOTRIJEBLJENIH ZA OZNAČAVANJE OTPORNIKA PO NAZIVNOM OTPORU I TOLERANCIJI

Boja	Brojka	Množi- telj	Tole- rancija	Boja	Brojka	Množi- telj	Tole- rancija
smeđa	1	10	+1%	ljubičasta	7	10 ⁷	—
crvena	2	10 ¹	+2%	siva	8	10 ⁸	—
narandžasta	3	10 ²	—	bijela	9	10 ⁹	—
žuta	4	10 ³	—	zlatna	—	10 ⁻¹	± 5%
zeleno	5	10 ⁴	—	srebrna	—	10 ⁻²	± 10%
plava	6	10 ⁵	—	nebojeno	—	—	± 20%

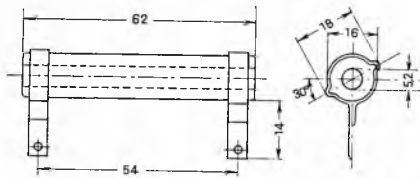
što je otpornik proizveden, zovu se *stalni otpornici*. Za razliku od njih, *promjenljivim otpornicima* i potencimetrima vrijednost se može podešavati mehaničkim putem (zakretanjem osovine ili pomicanjem klizača). Posebnu vrstu čine *otpornici kojima je otpor znatno ovisan o naponu ili temperaturi*. Vrijednost njihovog otpora je promjenljiva i može se podešavati, ali ne mehaničkim putem, već promjenom napona ili temperature.

Stalni otpornici služe vrlo često kao sastavni dijelovi u elektroničkim sklopovima, a stavljaju se na ona mjesta u električnom krugu gdje otporu nije potrebno mijenjati vrijednost ni pri podešavanju uređaja, ni prilikom njegove proizvodnje i ispitivanja, ni u normalnom radu.

Slojni otpornici. Sl. 3 prikazuje tipičan izgled slojnog stalnog otpornika opteretljivosti 1 W. Na cilindrično keramičko tijelo nanosen je tanki sloj ($10^{-2} \dots 10^{-6}$ mm) ugljika (*ugljeni slojni otpornik*) ili metala (*metalni slojni otpornik*). Da bi se povećala

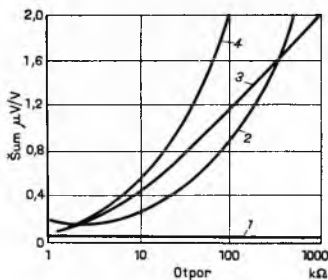


Sl. 3. Slojni otpornik opteretljivosti 1 W



Sl. 4. Slojni otpornik opteretljivosti 6 W

efektivna duljina otpornog sloja i time povećao otpor, na otpornicima većih omskih vrijednosti urezuje se u otporni sloj spiralni žlijeb duž cijele duljine otpornika. Krajevi otpornika prekrivaju se dobro vodljivim materijalom, također u tankom sloju, i na njima se nabijaju metalne kape na koje su nalemljene dovodne žice od pocinčanog bakra. Čitav je otpornik oločen izolacionom bojom, koja ga mehanički zaštićuje i električki izolira. Za otpornike s većom opteretljivošću primjenjuje se cjevasto tijelo (sl. 4), a dovodi su izvedeni pomoću metalnih traka koje obuhvaćaju krajeve otpornika.

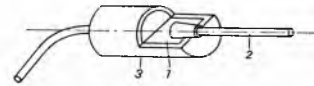


Sl. 5. Suma različitih vrsta otpornika. 1 Žičani, 2 ugljeni slojni, 3 metalni slojni, 4 maseni otpornici

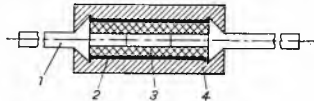
Suma im je manji (sl. 5, krivulja 2) nego u masenih otpornika (krivulja 4), ali veći nego u žičanih (krivulja 1). Proizvođači se s nominalnim vrijednostima otpora od 1 Ω do 10 MΩ i za opteretljivosti od 0,05 W do 20 W. Temperaturni koeficijent im je negativan i iznosi $\sim -0,03\%/^{\circ}\text{C}$. Nalaze primjenu u uređajima od kojih se traži velika pouzdanost i stabilnost i u uređajima koji rade na visokim frekvencijama.

Maseni otpornici. Postoje dvije vrste stalnih masenih otpornika. Otporni materijal jednih (sl. 6) čini cilindrično tijelo otpornika u koji su s oba kraja umetnute dovodne žice; druga vrsta ovih otpornika ima otporni sloj nanosen na staklenu cjevčicu (sl. 7), a dovodne žice ulaze u cjevčicu radi boljeg odvođa topline i obuhvaćaju je na krajevima, gdje čine kontakt s otpornim slojem. Ovi otpornici imaju malu stabilnost i relativno velik temperaturni i naponski koeficijent, kao što se to vidi iz sl. 8, gdje je prikazana promjena otpora za napone manje od nominalnog. Šum ovih otpornika također je velik. Proizvođači se s vrijednostima od nekoliko oma do desetak megaoma s opteretljivostima između 0,5 W i

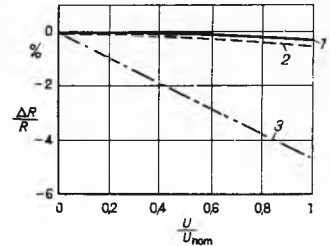
2 W i sa tolerancijom od 5% ili većom. Vrlo mnogo se primjenjuju u elektroničkim uređajima u kojima stabilnost nije od primarnog značenja.



Sl. 6. Maseni otpornik. 1 Otporna masa, 2 dovodna žica, 3 zaštitni sloj



Sl. 7. Presjek masenog otpornika sa slojem na staklenoj cjevčici. 1 Dovodna žica, 2 otporni sloj, 3 staklena cjevčica, 4 bakelitno kućište



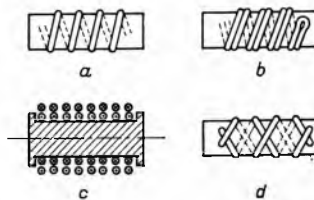
Sl. 8. Ovisnost otpora otpornika otpora 1 MΩ i snage 0,5 W o nari-nutom naponu. 1 Žičani, 2 slojni, 3 maseni otpornik

Žičani otpornici izrađuju se ili za veće snage, tj. s velikom opteretljivošću, ili su to precizni otpornici vrlo tačne nazivne vrijednosti s minimalnom tolerancijom i vremenski vrlo stabilni. Obje vrste građene su od namotâ otporne žice na tijelu od keramike. Otpornici s velikom opteretljivošću imaju sposobnost disipacije relativno velike snage na relativno malom prostoru. Materijali koji se upotrebljavaju moraju biti temperaturno vrlo otporni jer radna temperatura dosiže do 400°C . Izgled takvog otpornika isti je kao i izgled slojnog otpornika za veće snage (sl. 4), osim što je na cjevasto keramičko tijelo namotana žica, na krajevima vezana za trake koje služe kao dovodi. Cijeli otpornik prekriven je slojem emajla radi mehaničke i kemijske zaštite. U tabl. 2 prikazane su tipične dimenzije takvih otpornika.

Tablica 2
NOMINALNE OPTERETLJIVOSTI, OTPOR I DIMENZIJE ŽIČANIH OTPORNAKA ZA VEĆE SNAGE

Nominalna opteretljivost W	Otpor Ω	Približne dimenzije, mm	
		promjer	duljina
5	0,5... 1 600	8	25
10	0,3... 5 000	8	45
20	0,3... 10 000	14	50
25	0,3... 13 000	16	50
30	0,5... 23 000	19	75
40	0,6... 28 000	19	90
50	0,8... 40 000	19	115
75	1,2... 50 000	28	130
115	1,9... 90 000	28	165
160	2,6... 120 000	28	210
200	3,6... 150 000	28	260

Za namote žičanih otpornika upotrebljava se žica s promjerom ne manjim od 0,05 mm, izrađena od legura za izradu otporne žice koje su poznate pod različitim (komercijalnim) nazivima.



Sl. 9. Shematski prikaz načina namatanja žice žičanih otpornika. a Običan namot, b bifilarni namot, c namot s protusmjernim slojevima, d paralelni namot

Među ovakve legure idu: zlato-krom ($\alpha = (1 \dots 2) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), bakar-mangan (manganin, $\alpha = 0 \dots 20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), bakar-nikal (nikelin, konstantan, heureka, $\alpha = 40 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), nikal-krom (nikron, karma, kromatin, $\alpha = 20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, prikladan i za više radne temperature). Detaljne podatke v. *Elektrotehnički materijali*. Naponska opteretljivost otpornika iznosi ~ 20 V po milimetru

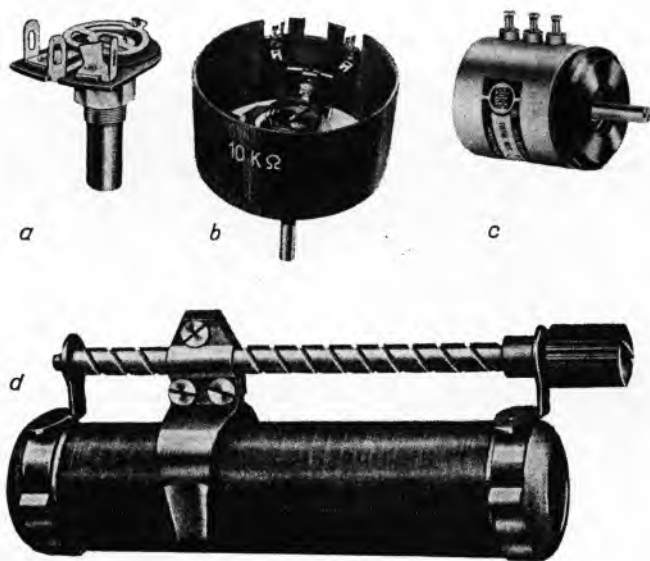
duljine otpornika. Tolerancija običnih žičanih otpornika je 5% ili 10%. Precizni otpornici izrađuju se i za tolerancije $< \pm 1\%$ (npr. $\pm 0,1\%$ i $\pm 0,05\%$, a iznimno i do $\pm 0,01\%$, npr. otpornici od karme). Kod preciznih otpornika valja uzeti u obzir i starenje koje je najveće u prvoj godini (npr. $0,01 \dots 0,03\%$).

Otpornici s preciznom vrijednošću otpora nemaju mogućnost disipacije većih snaga; oni se obično izrađuju za snage do 2 W.

Maksimalna vrijednost otpora je do 1 M Ω , ovisno o dimenzijama keramičkog tijela.

Za obje vrste žičanih otpornika upotrebljava se više različitih načina namatanja žice na keramičko tijelo (npr. bifilarno namatanje) da bi se dobio što manji induktivitet ili kapacitet, ili da bi se dobio željeni otpor na najekonomičniji način. Sl. 9 a, b, c, d prikazuje nekoliko vrsta namatanja žice.

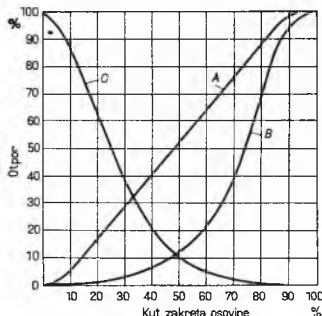
Promjenljivi otpornici u kojima se otpor mijenja mehaničkim putem mogu također biti maseni ili žičani. U oba se slučaja kontinuirana promjena vrijednosti otpora postiže pomoću pomičnog kontakta (klizača) koji klizi po otporniku. Klizač se pomiče ili zakretanjem osovine ili uzdužnim pomicanjem kontakta (sl. 10 a, b, c, d). Na otporniku postoje tri priključka: jedan za klizač i po jedan na svakom kraju otpornika. Kad se promjenljivi otpornik upotrebljava kao potencijometar, tj. kao promjenljivo djelilo napona, dovodi se na krajeve otpornika napon, a između jednog kraja i klizača dobiva se smanjen napon ovisan o položaju klizača.



Sl. 10. Promjenljivi otpornici (potencijometri), a Miniijturni maseni potencijometar, b žičani potencijometar, c potencijometar s helikoidno postavljenim otpornikom (helipot), d žičani promjenljivi otpornik s uzdužnim pomicanjem klizača

Kad se otpornik upotrebljava kao reostat, tj. kao otpornik s promjenljivim otporom, klizač može biti spojen i s drugim nepriklijučenim krajem otpornika.

Masnim promjenljivim otpornicima tijelo po kojem klizi klizač može biti cijelo od otporne mase ili ga može tvoriti nosač od izolatora, na koji je nanesen sloj otporne mase. Pomicanje klizača postiže se zakretanjem osovine na koju je klizač pričvršćen. Ovisnost kuta zakreta osovine i otpora između klizača i kraja može biti linearna (sl. 11, krivulja A) ili nelinearna, najčešće logaritamska (krivulje B i C). Nelinearna karakteristika postiže se nejednolikom smjesom otpornog i izolacionog materijala u masi koja čini otpornik. Klizni kontakt izvodi se kao grafitni štapić koji je oprugom pritisnut na površinu otpornika po kojoj klizi, čime se postiže da je prelazni otpor malen. Takav rotirajući kontakt spojen je s nepomičnim priključkom pomoću spiralne opruge, ili, kod minijturnih potencijometara, pomoću još jednog kliznog kontakta. Ovi otpornici podložni su mehaničkom trošenju i njihov otpor se u toku rada znatno mijenja. Opteretljivost im se kreće između 0,2 W i 2 W za napone do 500 V, a vrijednosti otpora mogu biti između 50 Ω i 10 M Ω .



Sl. 11. Karakteristika potencijometra: A linearnog, B logaritamskog, C negativnog logaritamskog

Postoje različite izvedbe promjenljivih otpornika. Kod nekih je predviđen i prekidač koji se uključuje čim se osovinu klizača pomakne iz svog početnog položaja. Drugi imaju dva (jednaka) otpornika kojima su klizni kontakti jedan s drugim mehanički vezani. Često se klizači dvostrukih otpornika ili potencijometara pokreću dvjema odvojenim koaksijalnim osovinama.

Žičani promjenljivi otpornici za male snage izrađuju se od neizolirane otporne žice (od istog materijala kao i stalni žičani otpornici) namotane na savitljivu traku od izolirajućeg materijala, koja se formira u kružni oblik i smjesti u odgovarajuće kućište ili spoji sa klizačem i osovinom (v. sl. 10 b). Klizni kontakt načinjen je od metala. Promjenljivi žičani otpornici izrađuju se najčešće s linearnom karakteristikom. Vrlo precizni linearni otpornici, tzv. *helipoti* (v. sl. 10 c), kod kojih je linearnost u granicama $\pm 0,1\%$, izvedeni su s pomoću helikoidno formirane trake na koju je namotana otporna žica. Pri zakretanju osovine, koja može načiniti nekoliko okretaja ($3 \cdots 10 \times 360^\circ$), klizni kontakt slijedi helikoidnu putanju.

Za veće snage između 20 W i 1 kW proizvode se promjenljivi otpornici namotani na toroidno keramičko tijelo. Zbog viših temperatura koje se pojavljuju pri radu i potrebe za dobrim odvodom topline, otporna se žica mota ponekad i na tijelo koje se sastoji od aluminijumske jezgre prevučene azbestom.

Temperaturno promjenljivi otpornici ili termistori su nelinearni elementi kojima se pri zagrijavanju mijenja električni otpor. Oni se izrađuju najčešće s negativnim, a ponekad i s pozitivnim temperaturnim koeficijentom.

Termistori s negativnim temperaturnim koeficijentom ($\alpha = -3 \cdots -6\%/^\circ\text{C}$) nazivaju se često i NTC-otpornicima (kratica od Negative Temperature Coefficient). Njihov se otpor smanjuje s porastom temperature. Oni se proizvode u dvije izvedbe: jedni se zagrijevaju strujom koja kroz njih protječe, a za zagrijavanje drugih predviđen je poseban odvojen grijači namot. Kao materijal za izradu takvih otpornika upotrebljava se oksidna keramika, tj. oksidi nekih metala (bakra, urana), koji imaju negativni temperaturni koeficijent otpora. Temperaturna ovisnost njihova otpora može se prikazati eksponencijalnom funkcijom

$$R = a e^{b/T}, \quad (1)$$

u kojoj je konstanta a ovisna o obliku i sastavu otpornika, a konstanta b o prirodi otporničkog materijala. Ovi otpornici podliježu starenju, tj. promjenama svojstava u toku rada. Da bi se te promjene smanjile, otpornici se podvrgavaju umjetnom starenju, tj. prije konačne upotrebe opterećuju se kroz neko vrijeme u teškom režimu rada. Tolerancije koje se daju za te sastavne dijelove odnose se, osim na nazivnu vrijednost, također na naponsku ovisnost i konstantu b u izrazu (1). Izrađuju se u obliku okruglih pločica ili u obliku malih kuglica smještenih u staklenu cjevčicu.

Termistori s vlastitim grijanjem primjenjuju se za temperaturnu kompenzaciju u krugovima s elementima koji imaju pozitivni temperaturni koeficijent, nadalje za stabilizaciju napona, kao mjerni pretvarači za mjerenje temperature tekućina i na površini čvrstih tijela, za utvrđivanje razine tekućina, za mjerenje brzine protoka tekućina i plinova, za mjerenje snage u području mikrovalova i kao elementi tranzistorskih krugova. Termistori s indirektnim grijanjem služe za daljinsko upravljanje, za mjerenje snage, za postizanje usporenog privlačenja i otpuštanja releja (njihova termička vremenska konstanta iznosi $3 \cdots 60$ s) (v. *Električna mjerenja*, TE 3, str. 645).

Termistori s pozitivnim temperaturnim koeficijentom ili PTC-otpornici (kratica od Positive Temperature Coefficient) primjenjuju se rjeđe. Njihov otpor brzo raste s porastom temperature ($\alpha \approx 10 \cdots 15\%/^\circ\text{C}$). Oni služe u temperaturnom području od -50 do $+150^\circ\text{C}$ za regulaciju i kontrolu temperature i za temperaturnu kompenzaciju, kao mjerni pretvarači za protok, tlak i sl. Takvi se otpornici danas izrađuju od poluvodiča, pretežno od sinterovanog barijum-titanata.

Naponski promjenljivi otpornici ili varistori također su nelinearni elementi, jer im otpor ovisi o naponu koji je na njih priključen. Njihov otpor pada s porastom napona. Otpor takvog otpornika proporcionalan je vrijednosti $U^{-\gamma}$, gdje je γ broj najčešće između 2,8 i 5. Izrađuju se u obliku okruglih pločica (diska) od silicijum-karbida (SiC) u prahu, pomiješanog s keramičkim

vezivnim materijalom, i upotrebljavaju se kao ograničavači napona. Pojava promjene otpora u ovisnosti o promjeni napona zasniva se na promjenljivom kontaktnom otporu između pojedinih karbidnih kristala.

Kondenzatori

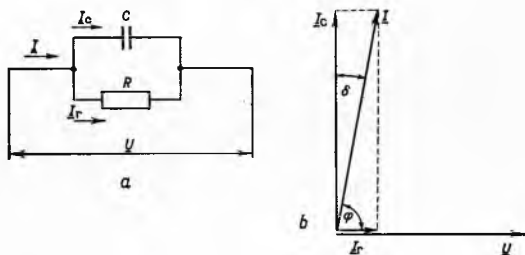
Kondenzator je sastavni dio električnog kruga koji predstavlja kapacitet, dakle element koji ima sposobnost da se u njega nakrca električni naboj Q . Pri tome se kondenzator nabije na napon U , i to tako da je trenutna vrijednost naboja proporcionalna naponu. Struja kroz idealni kondenzator (koji ima samo čistu kapacitivnost bez ikakvih parazitnih veličina) jednaka je vremenskoj promjeni naboja Q :

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}.$$

Struja je dakle proporcionalna brzini promjene napona, a faktor proporcionalnosti C zove se kapacitet. Ako je napon sinusoidna oblika, struja kroz kondenzator također je sinusoidna, ali fazno pomaknuta za 90° u odnosu prema naponu. U tom je slučaju idealni kondenzator element kojemu struja punjenja prethodi narinutom naponu za fazni kut od 90° .

Svaki kondenzator izveden je u načelu od dvije vodljive plohe (obloge) odvojene jedna od druge izolatorom (dielektrikom); kapacitet kondenzatora proporcionalan je dielektričnosti (dielektričnoj konstanti) izolatora ϵ i to je veći što su površine vodljivih ploha veće a razmak među njima (određen debljinom izolatora) manji. Dielektričnost (dielektrična konstanta) ϵ umnožak je apsolutne dielektrične konstante (influcione konstante) ϵ_0 , koja predstavlja dielektričnost vakuumu ($\epsilon_0 = 8,85434 \cdot 10^{-12}$ F/m), i relativne dielektričnosti (dielektrične konstante) ϵ_r , koja je različita za različite izolatore, uvijek je veća od jedinice, a za plinove praktički jednaka jedinici.

Gubici u kondenzatoru. Izolator (dielektrik) između ploča kondenzatora nije savršen i zbog toga se realni kondenzator može prikazati kao paralelni spoj idealnog kondenzatora kapaciteta C i otpornika otpora R , koji predstavlja konačan otpor izolatora



Sl. 12. Nadomjesna shema (a) i vektorski prikaz struja kondenzatora (b); C kapacitet idealnog kondenzatora, R otpor izolacije, δ kut gubitaka

(sl. 12 a). Ukupna struja kroz realni kondenzator, kad je napon sinusoidan, sastavljena je od dvije fazno za 90° pomaknute komponente I_c i I_r , tako da je fazni pomak ukupne struje $I = I_c + I_r$ kroz kondenzator za kut δ manji od 90° (sl. 12 b). Zbog postojanja struje I_r gubi se izvjesna snaga u kondenzatoru. Ti se gubici izražavaju kutom gubitaka ($\delta = 90^\circ - \varphi$) ili njegovim tangensom, tzv. faktorom gubitaka $\tan \delta$, koji prema sl. 12 b pri kružnoj frekvenciji ω iznosi

$$\tan \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{1}{R \omega C}.$$

Realni kondenzator prema tome predstavlja impedanciju apsolutne vrijednosti

$$Z = \frac{1}{\omega C \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}.$$

Osim gubitaka uslijed nesavršenosti izolatora, postoje i gubici u izolatoru uslijed njegove polarizacije. Određene vrste izolatora imaju takvu molekularnu građu da molekule predstavljaju električne dipole, koji se usmjeravaju pod utjecajem električnog polja, pa se zbog kretanja tih dipola stvara toplina. Kondenzator

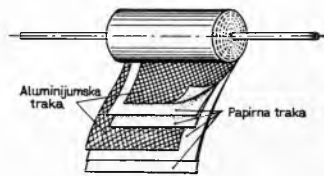
će imati i izvjesne Jouleove gubitke zbog protjecanja struje kroz vodič koji čini njegove vodljive obloge. Kao i kod otpornika, prikaz parazitnih veličina u koncentriranom obliku zadovoljava samo na nižim frekvencijama; na vrlo visokim frekvencijama kondenzator predstavlja vod s raspodijeljenim parazitnim otporima i induktivitetima (V. i *Elektrotehnički materijali*.)

Karakteristične veličine kondenzatora. Veličine koje karakteriziraju kondenzatore jesu: njegov nazivni ili nominalni kapacitet, tolerancija, temperaturno područje rada, temperaturni koeficijent kapaciteta, faktor gubitaka, te radni, maksimalni i ispitni napon. Osim toga se ponekad navodi vremenska konstanta kapaciteta (tj. promjena kapaciteta poslije dvogodišnjeg uskladištenja), granična frekvencija i parazitni induktivitet. Nominalna vrijednost kapaciteta ispisuje se na kućištu kondenzatora u mikrofaramidima ($\mu F = 10^{-6}$ F), nanofaramidima ($nF = 10^{-9}$ F) ili pikofaramidima ($pF = 10^{-12}$ F). *Radni napon kondenzatora* je vrijednost istosmjernog napona ili efektivna vrijednost izmjeničnog napona određene frekvencije kojim kondenzator smije biti opterećen u trajnom pogonu. *Maksimalni napon kondenzatora* je najveća vršna vrijednost napona između obloga koju kondenzator još podnosi bez oštećenja. *Temperaturnim područjem rada kondenzatora* naziva se područje između najviše i najniže temperature okoline u kojemu kondenzator još radi zadovoljavajući, a *temperaturni koeficijent kapaciteta kondenzatora* predstavlja relativnu promjenu njegova kapaciteta po stupnju promjene temperature u radnom području.

Podjela kondenzatora. Kondenzatori mogu biti stalni i promjenljivi. Kapacitet *stalnog kondenzatora* ne može se mijenjati pošto je kondenzator proizveden, kapacitet *promjenljivih kondenzatora*, pak, može se mijenjati u određenim granicama. Mehanička konstrukcija promjenljivih kondenzatora ili je takva da se kapacitet može podešavati za vrijeme rada uređaja u koji je kondenzator ugrađen, ili takva da se kapacitet podešava samo pri proizvodnji ili popravku uređaja (*kondenzatori za podešavanje ili polupromjenljivi kondenzatori*).

Stalni kondenzatori. Prema izolacionom materijalu od kojeg su napravljeni, stalni se kondenzatori mogu podijeliti na papirne kondenzatore, metalpapirne kondenzatore, kondenzatore od plastičnih masa, keramičke kondenzatore, kondenzatore od tinjca, kondenzatore od stakla i elektrolitske kondenzatore.

Papirni kondenzatori imaju kao dielektrik trake od specijalnog papira debljine $\sim 10 \mu m$, a kao vodljive obloge služe aluminijumske folije debljine $\sim 7 \mu m$, koje su jedna od druge razdvojene najmanje dvjema slojevima papira. Trake se motaju spiralno (sl. 13), da bi se na malom prostoru dobio što veći kapacitet. Namatanje može biti induktivno i antiinduktivno; kod antiinduktivnog namatanja (sl. 13) svaka je metalna traka još i radijalno električki kratko spojena jer se papirne trake nalaze samo po sredini cilindričnog tijela. Da bi papir zadržao dobra izolaciona svojstva, on se impregnira mineralnim uljima, vazelinom, parafinom, klornaftalinom, klordifenilom, poliestrom ili polivinilkarbazolom. Impregnacija je vrlo važna, jer neimpregnirani papir može primiti i do 20% vlage, a već pri 1% vlage izolacioni se otpor smanjuje za 10%. Probojna čvrstoća se također impregnacijom povećava sa 500 kV/cm na 2000 kV/cm. Faktor gubitaka ($\tan \delta$) time se smanjuje od $20 \cdot 10^{-4}$ na $40 \cdot 10^{-4}$, a relativna dielektričnost iznosi između 3,5 i 5,5. Metalna folija kvalitetnih kondenzatora mora biti izrađena od dovoljno čistog aluminijuma (99,5%).



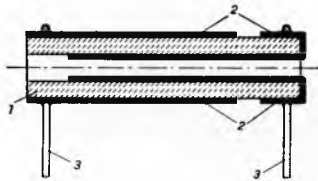
Sl. 13. Antiinduktivno namatanje papirnog kondenzatora

Papirni se kondenzatori proizvode u vrlo širokom opsegu nazivnih vrijednosti ($0,1 \dots 200 \mu F$) i naponske opteretljivosti (100 V do nekoliko kV). Nalaze svestranu primjenu u uređajima kojima gubici treba da budu mali i stabilnost velika. Osim kao sastavni dijelovi elektroničkih uređaja, oni se upotrebljavaju u energetskim mrežama za kompenzaciju jalove snage, tj. za korekciju faktora snage ($\cos \varphi$), uz kontakte za sprečavanje iskrenja, npr. na uređajima za paljenje benzinskih motora, uz električne strojeve za otklanjanje radio-smetnji, i dr.

Metalpapirni kondenzatori načinjeni su od papirne trake prevučene celuloznom lakom, na koju je naparen vrlo tanki sloj metala ($0,01 \dots 0,1 \mu\text{m}$), najčešće cinka. Kao druga obloga služi aluminijska folija, koja se zajedno s metaliziranim papirom namata na isti način kao i pri proizvodnji papirnih kondenzatora. Osobina ovih kondenzatora je sposobnost regeneracije (obnove izolacije nakon električnog proboja izolatora). Pri probodu se, naime, napareni metalni sloj isparava i kratki spoj između obloga nestaje, pa kondenzator postaje ponovo ispravan. Izrađuju se s nominalnim kapacitetima između $0,1$ i $8 \mu\text{F}$ i za napone do 350 V . Njihova je primjena svestrana, a kako se mogu napraviti manjih dimenzija nego papirni, upotrebljavaju se prvenstveno u uređajima gdje je ograničen prostor. Zbog njihove regenerativne sposobnosti, oni se primjenjuju i na mjestima gdje ne smije doći do potpunog kvara uređaja kad nastane probod kondenzatora.

Kondenzatori od plastičnih masa. Dielektrik takvih kondenzatora izrađuje se od različitih sintetičkih folija, koje imaju vrlo dobra izolaciona i dielektrična svojstva, pa ih nije potrebno impregnirati kao papir. U načelu sliče papirnim kondenzatorima, samo što su kod njih dovoljne jednostruke izolacione folije. Dielektrična konstanta ovih materijala relativno je mala, pa se takvi kondenzatori ne izrađuju za kapacitet veći od $1 \mu\text{F}$. Za dielektrik kondenzatora upotrebljava se najčešće polistiren (komercijalni naziv Styroflex), koji ima vrlo mali faktor gubitaka ($\tan \delta = 2 \cdot 10^{-4}$) i veliki izolacioni otpor, ali se može upotrijebiti samo u temperaturnom području od -10°C do 75°C . Osim polistirena primjenjuju se kao materijali za dielektrik također acetatna celuloza (Triafol N) s temperaturnim područjem $\vartheta_{\text{min}} \dots \vartheta_{\text{max}} = -40 \dots 100^\circ\text{C}$, tetrafluoretilen (Teflon), za temperature između -60 i 250°C , nadalje polietilen (Lupolen), polietilentetraftalat, polipropilen i drugi. Temperaturni koeficijent kapaciteta svih ovih materijala je negativan. Upotrebljavaju se na visokim frekvencijama, gdje su im gubici znatno manji nego u papirnim kondenzatorima. Umjesto metalne folije može kao jedan od obloga služiti napareni sloj metala. Takvi kondenzatori imaju, kao metalpapirni, sposobnost regeneracije.

Keramički kondenzatori imaju kao dielektrik keramiku, koja se može proizvesti sa sasvim određenim temperaturnim koeficijentom kapaciteta. Načinjeni su nanošenjem tankog sloja metala (najčešće srebra) na obje strane keramičke pločice ili cjevčice (sl. 14), koja se zatim premaže zaštitnim slojem ili zatvori u kućište. Metalni film dobro se veže uz keramičko tijelo obradom na visokoj temperaturi, uslijed čega su ti kondenzatori i vrlo stabilni. Ovisno o vrsti keramike, oni se dijele na kondenzatore s malom relativnom dielektričnošću ($\epsilon_r = 6 \dots 500$) i



Sl. 14. Keramički cjevasti kondenzator. 1 Keramička cjevčica, 2 srebrni slojevi, 3 dovodi

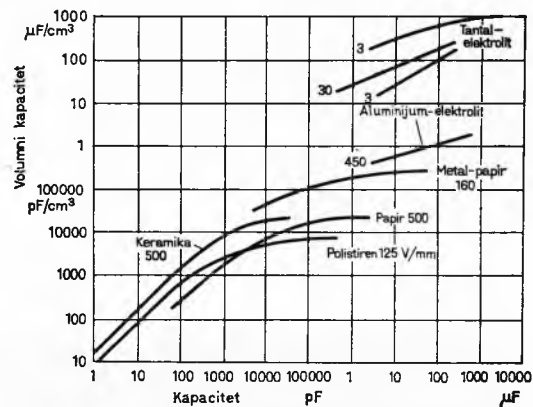
kondenzatore s velikom relativnom dielektričnošću ($\epsilon_r = 500 \dots 1000$). U prvu grupu idu kondenzatori na bazi magnezijum-silikata (talkuma) i titan-dioksida (rutila). Kapaciteti su im između 1 pF i 1 nF , a $\tan \delta < 10^{-4}$. Drugi tip, s kapacitetima od 1000 pF do $0,1 \mu\text{F}$, izrađuje se od feroelektričnih materijala vrlo velike dielektrične konstante, najčešće od barijum-titanata. Takvi materijali pokazuju svojstvo električne histereze (analogne magnetskoj histerezi fero magnetskih materijala). Za male nominalne napone izrađuju se kondenzatori relativno velikog kapaciteta nanošenjem tankog keramičkog sloja (koji ima poluvodička svojstva) na srebrnu podlogu. Zbog toga što se takvi kondenzatori mogu proizvesti s određenim negativnim temperaturnim koeficijentom, oni se upotrebljavaju i za temperaturnu kompenzaciju u sklopovima (najčešće titrajnim krugovima) u kojima se primjenjuju elementi (zavojnice, kondenzatori i vodovi) s pozitivnim temperaturnim koeficijentom. Keramički kondenzatori upotrebljavaju se i u krugovima gdje teku struje visokih frekvencija, pa i za velike prividne snage. Kondenzatori koji su predviđeni za rad s malim radnim naponom nalaze upotrebu u tranzistorskim sklopovima. Od keramike se najčešće izrađuju i *provodni kondenzatori*, koji služe za provođenje metalnog vodiča (žice) kroz otvor u metalnoj ploči.

Takva upotreba kondenzatora osigurava stabilan kapacitet između dotičnog vodiča i metalne ploče, koja je najčešće dio uzemljenog kućišta uređaja.

Kondenzatori od tinjca (liskuna) proizvode se od tankih ($20 \dots 70 \mu\text{m}$) pločica posebne vrste tinjca — muskovita, koji se odlikuje velikim izolacionim otporom i velikom dielektričnom konstantom. Proizvode se time što se izmjenično slažu metalne folije i pločice muskovita, cijeli paket se priteže izvana metalnim pločicama, a izvodi se tačkasto navare na folije jedne i druge obloge. Metalna obloga može se na muskovit nanijeti i napanivanjem. Moguće je proizvoditi takve kondenzatore i namatanjem traka kao u proizvodnji papirnih kondenzatora, ali se to čini rjeđe. Zaštićeni od vlage, ti su kondenzatori vrlo stabilni i imaju mali temperaturni koeficijent kapaciteta. Upotrebljavaju se u preciznim mjernim uređajima, u visokofrekventnoj telefoniji i u odašiljačima.

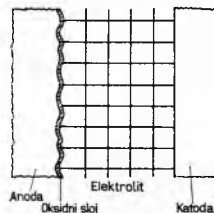
Kondenzatori od stakla i staklenog emajla upotrebljavaju se za rad na visokim temperaturama (do 200°C) i gdje je vlaga velika. Izrađuju se na sličan način kao kondenzatori od tinjca, s tim da se nakon formiranja podvrgavaju visokom pritisku i temperaturi, pri čemu se stvara zaštitno stakleno kućište, tako da cijeli kondenzator predstavlja čvrstu cjelinu. Mogu se izraditi za visoke radne napone i najčešće se upotrebljavaju u odašiljačima.

Elektrolitski kondenzatori imaju samo jednu metalnu oblogu, zvanu anoda, a drugu oblogu čini otopina elektrolita. Kao izolacioni sloj (dielektrik) služi sloj oksida koji se stvara u toku formiranja anodnom oksidacijom na metalnoj oblozi. Taj oksidni sloj, čija debljina iznosi samo $0,5 \dots 5 \mu\text{m}$ (već prema nazivnom naponu), ima vrlo veliku električku čvrstoću (10^7 V/cm) i veliku relativnu dielektričnost ($\epsilon_r = 8 \dots 30$). Zbog male debljine dielektrika i velike relativne dielektričnosti dobivaju se znatno veće vrijednosti kapaciteta po jedinici zapremine (volumenskog kapaciteta) nego s ostalim vrstama kondenzatora, kao što je to prikazano na sl. 15. Načelna konstrukcija prikazana je na sl. 16.



Sl. 15. Ikoristivost volumena za različite vrste kondenzatora. Brojevi označuju probojni napon u V/mm

Anoda je često hrapava (jetkana), da bi se dobile veće površine i time povećao kapacitet. Kao druga obloga rjeđe služi kompaktna otopina elektrolita, a češće papir ili tkanina natopljena u takvoj otopini. Drugi je pol kondenzatora u tom slučaju spojen s elektrolitom pomoću još jedne dodatne metalne elektrode koja se naziva katodom. Oksidni sloj na anodi tvori zaporni sloj koji ima ventilsko djelovanje. Ono se očituje u tome što teče samo vrlo mala struja, tzv. poprečna struja ili struja gubitaka, ako je elektrolit negativan u odnosu prema anodi, a uz obratni polaritet teče znatna struja, koja stvara oksid uz katodnu oblogu, pri čemu se razvija znatna toplina a dolazi i do razaranja kondenzatora. Zato su elektrolitski kondenzatori polarizirani (priključci označeni su sa + i -), a za izmjenične se struje mogu primjeniti samo nepolarizirani elektrolitski kondenzatori koji su ekvivalentni dvjema polariziranim kondenzatorima spojenim u seriju tako da me-

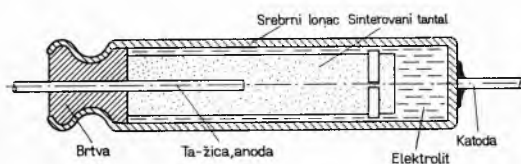


Sl. 16. Načelna konstrukcija elektrolitskog kondenzatora

du izvodima slijede jedna za drugom katoda — anoda — anoda — katoda. Takvi kondenzatori imaju, dakle, dvije anodne obloge. Elektrolitski kondenzatori imaju također svojstvo regeneracije, jer se u slučaju proboja uslijed toka struje razvija toplina, koja uzrokuje stvaranje novog oksida na mjestu proboja.

Materijal za elektrolitske kondenzatore je aluminijum ili tantal, a ponekad i niobijum ili titan. Elektrolitski kondenzatori od aluminijuma izrađuju se najčešće namatanjem anodne folije, nosača elektrolita i katodne folije (sl. 17), koji se nakon namatanja smjeste u aluminijumsko kućište. Negativni pol, tj. katoda, spaja se s kućištem, a pozitivni je pol spojen na žičani dovod koji je izoliran od kućišta. Aluminijum od kojeg se prave anodna i katodna folija mora biti vrlo čist. Debljina anodne folije iznosi $\sim 90 \mu\text{m}$, a katodne $\sim 50 \mu\text{m}$. Kao elektrolit upotrebljava se boks, borna kiselina i drugi spojevi, pomiješani s glikolom i glicerinom. Elektrolitski kondenzatori izrađuju se s nominalnim kapacitetima od $0,2 \dots 100 \mu\text{F}$, za napone od 250 do 500 V, i od $100 \dots 5000 \mu\text{F}$ za napone do 200 V, a temperaturno područje im je, već prema klasi, između -10°C i $+55^\circ\text{C}$, odnosno -65°C i $+70^\circ\text{C}$. Poprečna struja ili struja gubitaka (struja koja teče pri istosmjernom radnom naponu) u ovim kondenzatorima podržava stvaranje oksida. Na višim temperaturama, kad je stvaranje oksida ubrzano, struja gubitaka može biti znatno veća nego na niskim temperaturama. Struja gubitaka također je veća u kondenzatorima koji dulje vremena nisu bili priključeni na napon. Smanjenje ove struje postiže se upotrebom što čistijeg aluminijuma i za anodu i za katodu. Ipak je faktor gubitaka uvijek relativno velik i iznosi $\tan \delta \approx 0,25$. Zato se ovi kondenzatori upotrebljavaju na mjestima gdje je potreban velik kapacitet, a dozvoljeni su veći gubici, kao npr. u mrežnim filtrima i ispravljačima za izgladivanje valovitosti ispravljene struje i odvođenje nisko- i visokofrekventnih struja.

Elektrolitski kondenzatori od tantara izrađuju se ili pomoću folija (kao i aluminijumski) ili od sinterovanog tantara (sl. 18) smještenog zajedno s elektrolitom u srebrno kućište. (Umjesto elektrolita upotrebljavaju se u novije vrijeme i neki poluvodiči, npr. mangan-oksidi). Ovako priređen tantal ima veliku aktivnu površinu i relativnu dielektričnost do ~ 30 , te ovakvi kondenzatori imaju veći kapacitet po jedinici volumena (v. sl. 15) nego aluminijumski. I ostala svojstva tantalnih elektrolitskih kondenzatora znatno su bolja od svojstava aluminijumskih kondenzatora. Tako



Sl. 18. Elektrolitski kondenzator od sinterovanog tantara

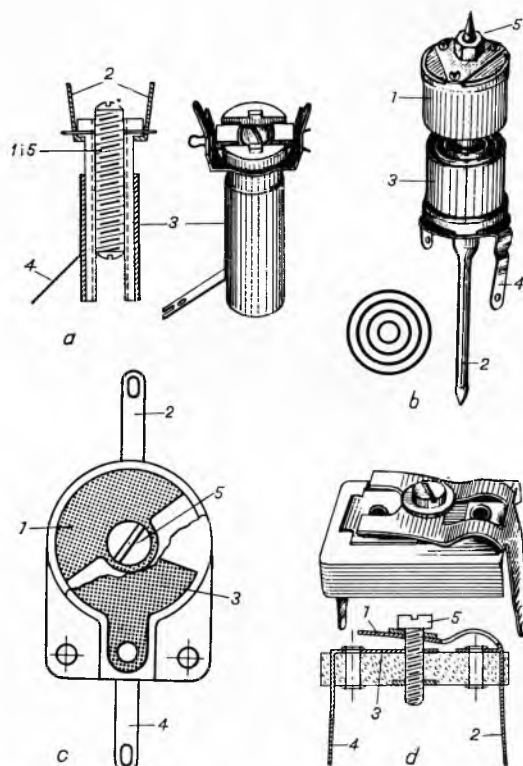
su npr. kapacitet i $\tan \delta$ u širokom području neovisni o temperaturi i frekvenciji. Temperaturno područje u kome se mogu upotrijebiti šire je ($-80^\circ\text{C} \dots +150^\circ\text{C}$), $\tan \delta$ je znatno manji, a svojstva na visokoj frekvenciji bolja. Upotrebljavaju se u uređajima gdje su potrebni minijsaturni ali kvalitetni kondenzatori velikog kapaciteta uz male nominalne napone.

Elektrolitski kondenzatori od niobijuma i titana slični su po konstrukciji kondenzatorima od tantara.

Promjenljivi kondenzatori. Kapacitet ovih kondenzatora može se mijenjati u određenim granicama i to mehaničkim putem, najčešće zakretanjem osovine spojene s nizom ploča koje čine jednu oblogu kondenzatora.

Kondenzatori za podešavanje (polupromjenljivi kondenzatori ili trimeri) predviđeni su za podešavanje kapaciteta samo pri proizvodnji ili popravku uređaja u koji su ugrađeni, a pri radu uređaja kapacitet im se ne može mijenjati. To su po svojim dimenzijama mali, najčešće zračni ili keramički kondenzatori, koji se dodaju paralelno nekom većem kondenzatoru da bi se ukupan

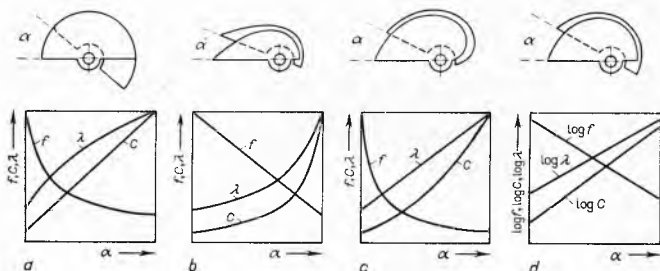
kapacitet mogao podesiti na željenu vrijednost. Na sl. 19 prikazane su četiri vrste ovih kondenzatora. Zračnom kondenzatoru sa zakretnim rotorom (sl. 19 a) mijenja se kapacitet zakretanjem rotora u odnosu prema statoru, čime se mijenja aktivna površina



Sl. 19. Različite izvedbe kondenzatora za podešavanje. a) Koncentrični kondenzator s vijkom, b) zračni koncentrični, c) keramički sa zakretnim rotorom, d) s oprugom na gornjoj oblozi; 1 gornja obloga kondenzatora, 2 priključak gornje obloge kondenzatora, 3 donja obloga kondenzatora, 4 priključak donje obloge kondenzatora, 5 vijak (matica) za podešavanje kapaciteta

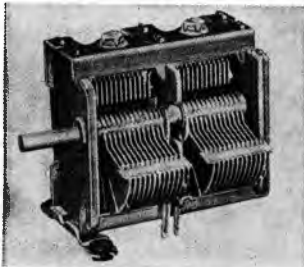
ploča koje čine kondenzator. Kod zračnog koncentričnog kondenzatora (sl. 19 b) to se postiže zakretanjem rotora koji se uslijed toga pomiče aksijalno po osovinu s narezom. I stator i rotor se ovdje sastoje od nekoliko koncentričnih cilindričnih ploča. Kondenzator s oprugom (sl. 19 d) ima kao izolator tinjac, a metalne se ploče pod djelovanjem opruge razmiču kad se odvija vijak, čime se smanjuje kapacitet. Keramički polupromjenljivi kondenzator (sl. 19 c) ima na keramiku nanese slojeve srebra u obliku polukružnih vijenaca. Pomicanjem rotora oko vijka koji služi kao osovina i priključak, slojevi srebra na rotoru i statoru dolaze jedan prema drugome u različite položaje, čime se mijenja kapacitet. Kapacitet se može podešavati od donje granice $2 \dots 8 \text{ pF}$ do gornje granice $30 \dots 600 \text{ pF}$, ovisno o tipu. Radni naponi se kreću između 300 i 1000 V, $\tan \delta$ iznosi $\sim 10^{-3}$.

Promjenljivi kondenzatori (u užem smislu), kojima se vrijednost kapaciteta može mijenjati u toku rada uređaja u koji su ugrađeni, imaju najčešće kao dielektrik zrak i izrađuju se sa dva niza para-



Sl. 20. Promjenljivi kondenzatori s pločicama različitih oblika za postizanje određenih ovisnosti $C = f(a)$. a) Linearni s obzirom na kapacitet, b) linearni s obzirom na frekvenciju titrajnog kruga u kojem je takav kondenzator, c) linearni s obzirom na valnu duljinu, d) logaritamski

telnih ploča od kojih je jedan (stator) nepomičan, a drugi (rotor) pomičan te se može zakretati oko osovine. Pri zakretanju osovine, ploče rotora mijenjaju svoj položaj u odnosu prema ploči statora, uslijed čega se mijenja i kapacitet kondenzatora. Za različite namjene promjenljivi se kondenzatori izrađuju s različitim oblicima ploča statora i rotora. Ovisnost između kuta zakreta osovine α i kapaciteta C može biti linearna (sl. 20 a), logaritamska (sl. 20 d) ili takva da su bilo rezonantna frekvencija f (sl. 20 b) bilo valna duljina λ (sl. 20 c) titrajnog kruga u koji je ugrađen promjenljiv kondenzator linearno ovisne o kutu α . Ploče se izrađuju od aluminijuma, bakra, mjedi ili neke druge legure, a mogu biti prevučene kadmijumom, niklom ili srebrom radi zaštite od korozije. Rotor i stator moraju biti jedan od drugog izolirani, a kao izolacioni materijal upotrebljavaju se držači od keramike ili, kod preciznih izvedbi, od kvarca. Ovi držači određuju izolacioni otpor tih kondenzatora, koji može iznositi i 10^9 MΩ. Gubici potječu uglavnom od otpora dovoda koji je znatan na višim frekvencijama uslijed skin-efekta.



Sl. 21. Okretljiv promjenljivi kondenzator

Česte su mehaničke izvedbe dvostrukih (sl. 21) ili trostrukih kondenzatora koji imaju više rotora spojenih na jednu osovinu. Takvi kondenzatori služe vrlo često u prijemnicima gdje je potrebno istovremeno mijenjati rezonantnu frekvenciju u dva ili tri titrajna kruga. Kapacitet zračnih kondenzatora najčešće se može mijenjati od 5 do 500 pF.

Kondenzatori sa čvrstim dielektrikom upotrebljavaju se u uređajima gdje je ograničen

prostor, a želi se dobiti velik promjenljiv kapacitet. Između izolatora i ploča rotora mora postojati sloj zraka, da bi se rotor mogao zakretati. Debljina ovog sloja ne može se tačno odrediti niti održati na stalnoj vrijednosti zbog uvijanja izolatora, pa su takvi kondenzatori manje tačni i manje stabilni nego zračni.

Zavojnice i transformatori

Struja koja teče kroz vodič ili neku zavojnicu stvara oko nje magnetsko polje. Magnetsko se polje može predočiti u sebe zatvorenim linijama (silnicama) od kojih svaka prikazuje jednu jedinicu magnetskog toka Φ . Broj silnica koje prolaze okomito kroz jedinicu površine predstavlja magnetsku gustoću B ; magnetski tok kroz površinu S iznosi, prema tome, $\Phi = B S$. Ako magnetski tok Φ obuhvaća n zavoja neke zavojnice, govori se o ulančanom magnetskom toku $\Psi = n \Phi$. Ako je magnetski tok uzrokovan vlastitom strujom svitka I , onda vezu između te struje i ulančanog toka Ψ daje izraz:

$$\Psi = L I \quad \text{ili} \quad L = \frac{\Psi}{I},$$

gdje je L konstanta proporcionalnosti koja se zove induktivitet ili induktivnost, a koja ovisi isključivo o materijalnim i geometrijskim svojstvima zavojnice. Jedinica za induktivitet je henri (H)

$$1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A} = 1 \text{ Vs/A}.$$

Zavojnica predstavlja, dakle, u električnom krugu, induktivitet L . Promjena ulančanog magnetskog toka stvara po zakonu elektromagnetske indukcije elektromotornu silu e koja je takvog predznaka da se suprotstavlja struji koja stvara magnetski tok. Pad napona na induktivitetu je, međutim, po iznosu jednak, ali po predznaku suprotan induciranoj elektromotornoj sili e . On je uz inače jednake uvjete proporcionalan brzini promjene struje:

$$u = -e = L \frac{di}{dt}.$$

Kad je struja kroz induktivitet sinusoidna, i napon na krajevima induktiviteta je sinusoidan, ali fazno pomaknut za 90° u odnosu prema struji.

Parazitne veličine zavojnice. Zavojnica, koja se najčešće sastoji od više zavoja vodljive žice, sadrži osim induktiviteta također otpor i kapacitet. Otpor zavojnice nije zanemarljivo malen i on uzrokuje u njoj gubitke snage. Taj je otpor raspodijeljen duž cijele zavojnice, ali se on može prikazati i kao koncentrirani element tako da se zavojnica prikaže kao serijski spoj induktiviteta L i otpora R . Faktor dobrote (kvaliteta) Q takve zavojnice definira se kao omjer jalove snage P_q i djelatne snage P ili kao omjer padova napona izmjenične struje (kružne frekvencije ω) na induktivitetu i na otporniku, tj.

$$Q = \frac{P_q}{P} = \frac{\omega L I}{R I} = \frac{\omega L}{R}.$$

Pad napona na induktivitetu u slučaju sinusoidne struje i efektivne vrijednosti struje I jednak je, naime, $\omega L I$.

Zavoji žice koji čine zavojnicu predstavljaju zajedno i izvjestan kapacitet, a dielektrični gubici koji se pojavljuju u vezi s tim kapacitetom povećavaju ukupne gubitke zavojnice.

Induktivnost L zavojnice (solenoida) sa n zavoja namotanih na dugačko cilindrično tijelo duljine l i presjeka S iznosi uz izvjesna zanemarenja:

$$L = \mu \frac{n^2 S}{l}, \quad (2)$$

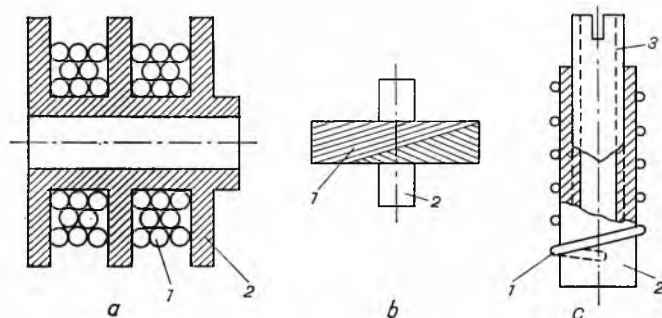
gdje je μ permeabilnost tijela kroz koje se zatvara magnetski tok. Permeabilnost μ može se rastaviti na dva faktora: $\mu = \mu_r \mu_0$. μ_r je čist broj, relativna permeabilnost, a μ_0 je indukciona konstanta, $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$. Prema relativnoj permeabilnosti μ_r , zavojnice mogu biti ili bez jezgre, kad se magnetski tok zatvara kroz materijal relativne permeabilnosti jednake jedinici, ili sa magnetskom jezgrom, kad se magnetski tok zatvara kroz jezgrom od materijala koji ima relativnu permeabilnost znatno veću od jedinice.

Zavojnice bez jezgre sastoje se od vodiča namotanog na tijelo helikoidno uvijenog ili drugog pogodnog oblika. Vodič je najčešće bakrena žica kružnog presjeka izolirana pamukom, svilom ili lakom, a rjeđe srebrna ili posrebrna bakrena žica. Bakrene trake upotrebljavaju se za zavojnice kroz koje teku veće struje, a bakrene ili posrebrene cijevi upotrebljavaju se za zavojnice kroz koje teku jake struje visoke frekvencije. Radi smanjenja gubitaka uslijed skin-efekta upotrebljavaju se kao vodiči cijevi i visokofrekventni vodovi; ovi posljednji sastoje se od više tankih lakom izoliranih bakrenih žica (promjera 0,05...0,1 mm) koje su jedne s drugima spiralno upređene.

Nosači ili tijela zavojnica izrađuju se od bakelita, polistirena, keramike ili prešanog papira. Namotana žica se zajedno s tijelom često zalije voskom ili nekom umjetnom smolom radi impregnacije i mehaničke zaštite. Prema načinu namatanja, zavojnice bez jezgre mogu biti jednoslojne ili višeslojne, cilindrične, pločaste, okvirne ili prstenaste (sl. 22). Jednoslojne zavojnice koje su motane tako da im se zavoji ne dodiruju imaju najmanji parazitični kapacitet. Parazitni kapacitet višeslojnih zavojnica nastoji se smanjiti namatanjem žice na nosač sa pregradama (sl. 22 a). Pločaste zavojnice (sl. 22 b) motaju se obično unakrsno i to od visokofrekventnog vodiča.

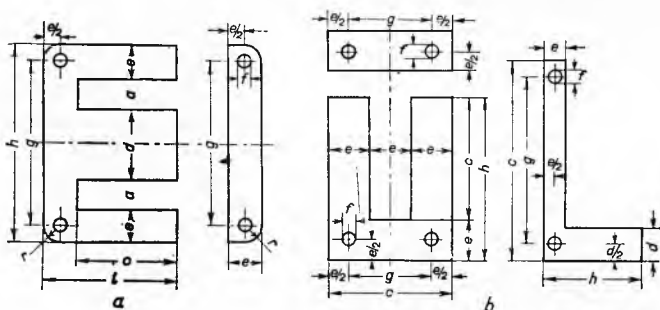
Induktivitet pojedinih vrsta zavojnica izračunava se na temelju formule (2), koja vrijedi za dugačku i usku zavojnicu. Kad su posrijedi kratke zavojnice, taj se izraz korigira faktorima dobivenim empirijski. I rasipni se kapacitet takvih zavojnica računa na temelju empirijski dobivenih podataka. Ovakve se zavojnice upotrebljavaju ili kao elementi u titrajnom krugu kad se traži da im gubici budu što manji, ili kao prigušnice, tj. elementi koji treba da sprečavaju prolaz visokofrekventnih izmjeničnih struja; i tada se traži da im rasipni kapacitet bude malen.

Zavojnice s magnetskom jezgrom mogu biti otvorenog ili zatvorenog tipa. Magnetski tok zavojnica otvorenog tipa prolazi samo kratkim dijelom kroz magnetsku jezgrom, a po znatno većoj duljini prolazi kroz zrak. Ovdje magnetska jezgra služi više povećavanju induktiviteta nego njegovom povećanju ili povećanju faktora dobrote. Takve zavojnice izrađuju se s cilindričnim ili pločastim namotima smještenim na šuplji cilindrični nosač koji s unutarnje strane ima navoj (sl. 22 c). Zakretanjem magnetske jezgre, koja također ima navoj, postiže se njeno aksijalno pomi-



Sl. 22. Različite izvedbe zavojnica. a) Zavojnica s cilindričnim višeslojnim namotom na tijelu s pregradama, b) koturasti (unakrsni) namot zavojnice, c) zavojnica s magnetskom jezgrom otvorenog tipa i cilindričnim jednoslojnim namotom, d) zavojnica s lončastom feritnom jezgrom; 1 namot, 2 tijelo, 3 magnetska jezgra za podešavanje induktivnosti, 4 lončasta feritna jezgra, 5 kućište

canje, a time i promjena induktiviteta. Zavojnice zatvorenog tipa imaju zatvorenu magnetsku jezgru i magnetski tok se zatvara po cijeloj dužini kroz jezgru (sl. 22 d). Jedino kad jezgra ima zračni raspor, magnetski tok na kratkom dijelu puta prolazi i kroz zrak. Magnetska je jezgra napravljena od među sobom izoliranih željeznih limova ili od nehomogenog magnetskog materijala (ferita). U području niskih frekvencija upotrebljavaju se jezgre od čeličnih limova debljine 0,1 do 1 mm. Kao materijal za izradu limova upotrebljava se čelik sa 0,5...4% silicijuma, ili su to posebne visokopermeabilne legure željeza i nikla (npr. Permalloy), željeza, nikla i kobalta (npr. Perminvar) ili željeza, nikla i mangana (v. *Elektrotehnički materijali*). Oblici i dimenzije često upotrebljivanih limova vide se na sl. 23 i u tabl. 3. Upotrebljavaju se cilindrični višeslojni namoti od bakrene žice izolirane lakom, pamukom ili svilom. Faktor dobrote ovih zavojnica ovisi ne samo o gubicima u namotu već i o gubicima u željeznoj jezgri, koji potječu od vrtložnih struja i histereze. Paraziti kapaciteti potječu od kapaciteta između pojedinih slojeva namota. Induktivnost ovakve jezgre izračunava se također prema izrazu (2), samo se za permeabilnost μ uzima dinamička permeabilnost dotičnog materijala, a l je



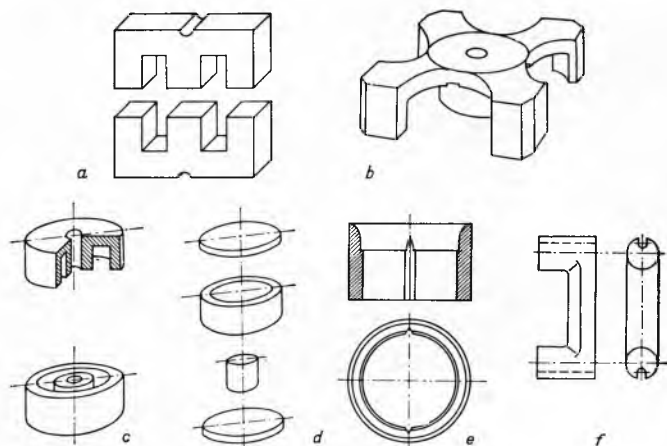
Sl. 23. Profili limova za zavojnice (prigušnice) i transformatore: a EI-profil, b UI-profil, c L-profil

Tablica 3
DIMENZIJE ŽELJEZNIH LIMOVA ZA TRANSFORMATORE I ZAVOJNICE (u milimetrima)

Oznaka dimenzije	Oznaka oblika lima						
	E/I 42	E/I 60	E/I 130	U/I 30	U/I 60	U/I 114	L 59
<i>h</i>	42	60	130	40	80	152	13
<i>e</i>	7	10	17,5	10	20	38	5
<i>f</i>	3,5	3,5	6,6	3,5	4,5	11	2,8
<i>c</i>	21	30	70	30	60	114	59
<i>d</i>	14	20	35				9
<i>a</i>	7	10	30				
<i>g</i>	35	50	115	20	10	50	50
<i>r</i>	28	40	87,5				
			6				

duljina preko koje se magnetski tok zatvara kroz jezgru. Svici s jezgrom sa zračnim rasporom imaju znatno manju induktivnost i ova je također neovisna o amplitudi struje koja kroz te svitke protječe. Već pri rasporima većim od 0,5 mm induktivnost takve zavojnice određena je gotovo isključivo širinom tog raspora i može se izračunati iz izraza (2) uzimajući $\mu_r = 1$ i l jednako širini raspora. Kad se takva zavojnica upotrebljava kao prigušnica, kroz nju često teče i istosmjerna struja. Zavojnica radi u tom slučaju s predmagnetiziranjem, a njezina je induktivnost ovisna o jakosti istosmjerne struje. Primjenom zračnog raspora postiže se smanjenje utjecaja istosmjerne struje na vrijednost induktivnosti zavojnice.

Na višim frekvencijama upotrebljavaju se jezgre od nehomogenog magnetski mekanog materijala poznatog pod nazivom ferit (v. *Elektrotehnički materijali*). Materijal je sastavljen od oksida željeza i oksida nekih divovalentnih metala (npr. cinka), koji su povezani pomoću nekog vezivnog materijala. Tako dobivene jezgre odlikuju se vrlo malim gubicima uslijed vrtložnih struja i zato daju velike faktore dobrote i na visokim frekvencijama. Jezgre se dobivaju prešanjem, a mogu imati različite oblike (sl. 24). Vrlo često upotrebljavane zavojnice sa lončastom jezgrom (sl. 24 d i e) imaju cilindričan namot od lakom izolirane bakrene žice namotane na bakelitno tijelo, koje se može smjestiti u lončastu jezgru. Jezgre su napravljene u dva ili više dijelova između kojih može postojati zračni raspor kad se zavojnica smjesti u kućište (sl. 24 d). Ako



Sl. 24. Feritne jezgre za zavojnice i transformatore. a) E-jezgra, b) krstasta jezgra, c) jezgra za visokonaponski transformator televizijskih prijemnika, d) lončasta jezgra (rastavljena), e) lončasta jezgra, f) jezgra za otklonske zavojnice kineskopa

zračni raspor postoji, induktivnost se može podešavati dodatnom pomičnom jezgrićom koja je cilindričnog oblika, smještena je u centar jezgre i može se aksijalno pomicati pomoću navoja ili pomoću trake koja prolazi kroz zračni raspor i ima na sebi magnetski materijal nejednolike debljine.

Faktor dobrote zavojnica s feritnom jezgrom mijenja se s frekvencijom, a na određenoj frekvenciji ima maksimum. On ovisi još i o zračnom rasporu, broju zavoja, promjeru žice i o dimenzijama i vrsti materijala jezgre. Tako se npr. zavojnicama s feritnom jezgrom induktiviteta 5...10 mH postižu na frekvencijama između 50 i 100 kHz faktori dobrote i veći od 1000. Induktivitet zavojnice s feritnom jezgrom proporcionalan je kvadratu broja zavoja, a osim toga ovisi o zračnom rasporu, vrsti ferita i dimenzijama jezgre.

Transformatori, za razliku od zavojnica, imaju dva ili više namota jedan prema drugome smještena tako da struja kroz jedan namot stvara magnetski tok koji je djelomično ulančan i s ostalim namotima. Kad postoje samo dva namota — primar i sekundar — magnetski tok Φ_1 kroz prvi namot jednak je

$$\Phi_1 = L_1 i_1 + M i_2,$$

a tok kroz drugi namot je

$$\Phi_2 = L_2 i_2 + M i_1.$$

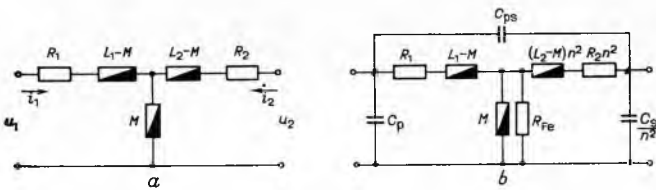
L_1 i L_2 su induktivnosti namota kroz koje teku struje i_1 i i_2

stvarajući tokove Φ_1 i Φ_2 , a M je koeficijent koji pokazuje koliki je dio toka što ga stvara struja i_1 ulančan s drugim namotom, kroz koji teče struja i_2 . Koeficijent M naziva se *međuinduktivnost*, a razlike $L_1 - M$ i $L_2 - M$ jesu rasipne induktivnosti primara, odnosno sekundara. Ako se uzmu u obzir i omski otpori namota, R_1 i R_2 , dobivaju se za napone na primaru u_1 i sekundaru u_2 izrazi

$$u_1 = -e_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = R_1 i_1 + (L_1 - M) \frac{di_1}{dt} + \frac{d}{dt} (i_1 + i_2) M, \quad (3)$$

$$-u_2 = -e_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = R_2 i_2 + (L_2 - M) \frac{di_2}{dt} + \frac{d}{dt} (i_1 + i_2) M. \quad (4)$$

Prema ovim izrazima može se transformator nadomjestiti strujnim krugom kako je prikazano na sl. 25 a, jer za transformator i za taj strujni krug vrijede iste jednadžbe (3) i (4).



Sl. 25. Nadomjesna shema transformatora: a bez parazitnih kapaciteta i elemenata sekundara, b sa parazitnim kapacitetima i elementima u sekundaru, reduciranim na primar

Transformatori se u elektroničkim sklopovima primjenjuju za transformiranje napona ili struje, za prilagođenje otpora jednog opterećenog kruga na otpor drugog kruga, za galvansko odvajanje strujnih krugova i za okretanje faze. Ako broj zavoja primarnog namota (primara) iznosi n_1 , a broj zavoja sekundarnog namota (sekundara) n_2 , kaže se da taj transformator ima prenosni omjer $n = n_1/n_2$.

U idealnom transformatoru, tj. u transformatoru bez gubitaka i s beskonačnim permeabilitetom, prenosi se snaga $P = U_1 I_1 = U_2 I_2$, a prenosni omjer je

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Otpor sekundarnog kruga prenosi se na primarni krug i opterećuje ga proporcionalno kvadratu prenosnog omjera, pa je

$$R_p = \frac{U_1}{I_1} = n^2 R_s.$$

Stvarni, realni transformatori imaju, međutim, određenu permeabilnost, rasipanje, kapacitet među zavojima namota, gubitke zbog histereze, vrtložnih struja i drugih uzroka, pa se zbog toga dio snage izvora pretvara u samom transformatoru u toplinu. Induktivitet, kapacitet i rasipni induktivitet uzroci su nejednolikog prigušivanja struja različitih frekvencija. Da se spriječe nelinearna izobličenja (v. *Elektroakustika*, str. 308) pri prenosu signala, transformatori se pogone na početnom dijelu svoje karakteristike $B(H)$.

Nadomjesna shema takvog transformatora prikazana je na sl. 25 b. C_p i C_s su parazitni kapaciteti primara i sekundara, C_{ps} je parazitni kapacitet između namota primara i sekundara, R_F su gubici u jezgri.

Transformatori kao sastavni dijelovi elektroničkih uređaja upotrebljavaju se ili kao transformatori bez jezgre u području visokih frekvencija ili kao transformatori s magnetskom jezgrom u području nižih frekvencija.

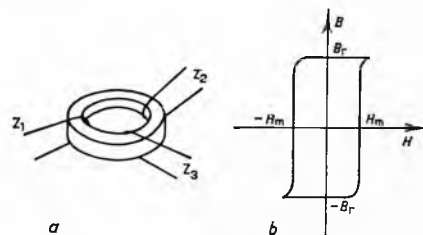
Transformator bez jezgre čine dvije ili više zavojnica bez jezgre ili s jezgrom otvorenog tipa, koje su zavojnice jedna od druge razmaknute tako da između njih postoji sasvim određena međuinduktivnost. Ako namoti transformatora ujedno predstavljaju i induktivitet titrajnog kruga, ovim se međuinduktivitetom može podesiti širina frekventnog područja oko rezonantne frekvencije.

Radi zaštite od vanjskih polja oklapaju se ovakvi transformatori ponekad metalnim lončicama.

Transformatori s magnetskom jezgrom. Za transformatore koji rade u području tonskih frekvencija upotrebljavaju se kao materijal za jezgru najčešće čelični limovi (isti kao i za zavojnice) ili se jezgra pravi od čelične trake. Transformatori s magnetskom jezgrom kao elektronički sastavni dijelovi mogu se prema njihovoj namjeni podijeliti na ulazne, međustepene, izlazne, modulacione, linijske i mrežne transformatore. *Ulazni transformator* služi za povezivanje generatora signala (vrlo često mikrofona) s prvim stupnjem pojačala. Njegov je zadatak da niski napon iz generatora, priključen na primar (n_1), transformira na što viši napon na sekundaru (n_2). Broj zavoja sekundara mora u tom slučaju biti $n_2 \gg n_1$. No da bi se sve tonske frekvencije prenosiše što jednoličnije, n_2 ne smije biti ni preveliki. On je, naime, ograničen rasipnim kapacitetom sekundara C_s i ukupnom rasipnom induktivnošću koja u području viših tonskih frekvencija tvori serijski titrajni krug, zbog čega može doći do znatnog rezonantnog nadvišenja. *Međustepeni transformatori* upotrebljavaju se za vezu između pojedinih stupnjeva pojačala, pri čemu vrše prilagođenje između izlaznog i ulaznog otpora, galvanski razdvajaju krugove i smanjuju izobličenja koja nastaju uslijed njihove nelinearnosti. Induktivnost primara L_1 takvog transformatora mora biti dovoljno velika da bi i prenos niskih frekvencija bio još dobar, jer treba velikom izlaznom otporu pojačala prilagoditi impedanciju primara. *Izlazni transformator* veže izlazni stupanj pojačala s trošilom (npr. izlaz zvučnog pojačala sa zvučnikom) i služi za optimalno prilagođenje opterećenog otpora pojačalu. Takav transformator treba da prenosi snagu, a da bi to činio jednoliko na svim frekvencijama određenog područja, treba za kvalitetan prenos niskih frekvencija dovoljno dimenzionirati primarni namot, a za prenos visokih frekvencija suzbiti rasipni induktivitet. To se postiže izvođenjem primarnog namota u dva ili više dijelova, među koje se smješta sekundar. Posebnu vrstu izlaznog transformatora čini *modulacioni transformator*; njegov je opteretni otpor anodni krug pojačala koje radi u klasi C i pomoću kojeg se postiže amplitudna modulacija (v. *Elektronika, uređaji*). *Linijski transformator* služi za povezivanje i međusobno prilagođenje valnog otpora komunikacionih linija. Za napajanje uređaja iz gradske mreže upotrebljava se *mrežni transformator* koji transformira napon mreže na napone potrebne sklopovima u uređaju (npr. ispravljaču). Taj se transformator gradi tako da prenosi dovoljnu snagu (ali samo) na frekvenciji mreže (najčešće 50 Hz).

Feritne se jezgre također upotrebljavaju za niskonaponske transformatore, jer imaju manje gubitke od limova i manjih su dimenzija, a naročito su pogodne za upotrebu u štampanim krugovima. Nekoliko tipičnih feritnih jezgara za transformatore bilo je prikazano na sl. 24.

Feritne jezgre prstenastog oblika s pravokutnom petljom histereze (sl. 26 a) upotrebljavaju se kao elementi memorija i logičkih sklopova. One mogu ostati u dva različita magnetska

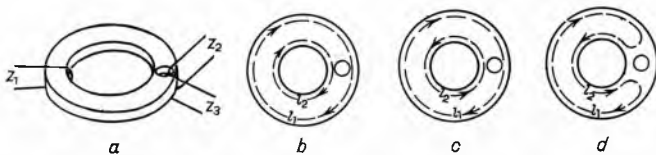


Sl. 26. Prstenasta jezgrica. a) Prstenasta jezgrica sa tri namotaja, b) pravokutna petlja histereze

stanja određena pozitivnim ili negativnim remanentnim magnetizmom $+B_r$ i $-B_r$ (sl. 26 b). Ako je jezgra ostala u stanju $-B_r$ zbog prolaza struje kroz namote z_1 i z_2 , tada će, ako struje kroz namote z_1 i z_2 zajednički istovremeno proizvedu polje $+H_m$, doći do promjene magnetske indukcije od $2B_r$, što će inducirati naponski impuls u namotu z_3 . Ako je jezgra bila u stanju $+B_r$, neće biti promjene indukcije niti induciranog napona. Napon je, prema tome, indikator stanja jezgre. «Čitanjem» informacije iz

jezgre uništava se sama informacija (v. *Digitalna računala*, TE 3, str. 321).

Informacija upisana u prstenastu jezgru sa dva otvora (*transfluksor*) čitanjem se ne uništava. Kroz veći, centralni otvor u jezgri prolazi namot z_1 (sl. 27 a) tako da struja kroz njega djeluje na magnetski tok cijele jezgre. Jedno stanje nastupa kad su tokovi i vanjskog kruga l_1 (sl. 27 b) i unutarnjeg kruga l_2 polarizirani u istom smjeru (npr. u smjeru kazaljke na satu). U tom slučaju



Sl. 27. Transfluksor. a Shematski prikaz, b blokirano stanje, c deblokirano stanje, d stanje nakon čitanja

struja kroz namot z_2 ne može izazvati promjenu indukcije i u namotu z_1 se ne inducira nikakav napon. To je blokirano stanje transfluksora. Ako se, međutim, strujom kroz z_1 promijeni smjer polarizacije unutarnjeg kruga l_2 (sl. 27 c), struja kroz z_2 promijenit će polaritet toka, ali samo oko manjeg otvora (sl. 27 d), i u namotu z_2 se inducira napon. Strujom suprotnog polariteta kroz z_2 vraća se transfluksor u ranije neblokirano stanje, što znači da čitanjem informacija nije uništena. Moguće su izvedbe transfluksora sa većim brojem otvora i namota.

Element koji sadrži više od jedne informacije (jednog bita) je *twistor*, koji se sastoji od magnetske žice, torziono prednapete tako da se magnetsko polje postavlja u određeni pravac (pravac lakšeg magnetiziranja). Smjer toga polja tada predstavlja upisanu informaciju, koja se upisuje istovremenim strujama kroz žicu i kroz namot oko nje.

AKTIVNI ELEKTRONIČKI SASTAVNI DIJELOVI ELEKTRONKE

Za razliku od pasivnih, aktivni elektronički sastavni dijelovi djeluju kao izvori struje ili napona. U elektronkama (elektron-skim cijevima), koje predstavljaju jednu grupu tih sastavnih dijelova, nosioci struje su elektroni koji se gibaju u vakuumu ili u plinu niskog pritiska. Razlikujemo stoga vakuumske i plinom punjene elektronke. U drugu grupu idu poluvodički elementi, koji vode struju posredstvom elektrona i šupljina, ali je gibanje tih nosilaca u čvrstoj tvari. U poluvodičke sastavne dijelove ubrajaju se i integrirani sklopovi, koji predstavljaju elektroničke sklopove s aktivnim i pasivnim elementima. U njima su aktivni, a često i pasivni elementi izrađeni od poluvodiča.

U ovoj glavi našeg članka, od aktivnih elektroničkih sastavnih dijelova obrađene su elektronke; o poluvodičkim aktivnim sastavnim dijelovima riječ je u sljedećoj glavi, koja obrađuje poluvodičke sastavne dijelove uopće.

Još je 1873 F. Guthrie zapazio izbijanje elektroškopa u blizini zagrijanog tijela, što je bilo prvo zapažanje termionske emisije. Kasnije su J. Elster i H. F. Geitel, i neovisno o njima T. A. Edison, primijetili vođenje struje u evakuiranom balonu u kojem pored žarne niti postoji i pozitivna elektroda. 1904 izumio je i patentirao A. J. Fleming prvu diodu (tada zvanu termionski ventil) i njezinu primjenu kao detektor (ispravljač visokofrekventnih struja) u radio-prijemnicima. Ta se prva dioda sastojala od evakuiranog staklenog balona u kome je bila ugrađena žarna niti kao katoda i još jedna elektroda kao anoda. 1906 Lee De Forest uvodi u takvu diodu treću elektrodu u obliku rešetke između anode i katode i primjenjuje je za pojačanje niskofrekventnih struja. Razvoj tih tzv. elektronki ili elektronskih cijevi mnogo je ubrzan u toku prvog svjetskog rata potrebama zaraćenih strana za boljim radio-vezama. Tada su usavršavanju elektronki (dioda i trioda) mnogo pridonijeli radovi I. Langmuira. U to se vrijeme izrađuju i velike triode koje se primjenjuju u prijemnicima i koje omogućuju radio-televizijski prijem i preko Atlantika (1915). W. Schottky uvodi i četvrtu elektrodu i dobiva tetrodu. Poslije prvog svjetskog rata, uslijed stvaranja radiodifuznih mreža, proizvodnja elektronki naglo raste, a cijena im pada. Elektronke s više rešetaka proizvode se iza 1930 i primjenjuju se u krugovima niske i visoke frekvencije. Istovremeno izrađuju se i usavršavaju katodne cijevi i fotocijevi. Drugi svjetski rat opet ubrzava razvoj elektronki i one postaju sve manjih dimenzija. Iza tog rata razvoj se nastavlja (cijev s putujućim valom, cijev za reprodukciju slike u boji itd.) sve do 50-tih godina, kad tranzistori počinju potiskivati cijevi iz mnogih područja.

Osnovni principi rada elektronske cijevi. Rad elektronki zasniiva se na emisiji slobodnih elektrona iz metala i njihovom gibanju u električnim i magnetskim poljima. Električna se polja pojavljuju u elektronkama između pojedinih elektroda na kojima

vladaju različiti potencijali ili u međuelektrodnom prostoru zbog naboja nagomilanih elektrona ili iona plina (npr. prostornog naboja). Za stvaranje magnetskih polja služe zavojnice kroz koje protječe struja, a postavljene su obično oko elektronskih cijevi.

U elektronskim cijevima izlaze elektroni iz pojedinih elektroda (prvenstveno katode) zbog termionske (termoionske) emisije, zbog sekundarne emisije, zbog fotoelektrične emisije i zbog emisije djelovanjem električnog polja. Kod termionske se emisije povišenjem temperature elektronima povećava kinetička energija. Kad uslijed komponente brzine gibanja elektrona okomite na površinu metala ta energija postane jednaka radu izlaza elektrona ili veća od njega, elektroni mogu izaći iz metala. Sekundarna emisija elektrona iz metala nastaje prvenstveno prenošenjem energije iona i metastabilnih atoma na elektrone u metalu. Do fotoelektrične emisije elektrona dolazi kad fotoni svjetla koji padaju na metal predaju svoju energiju elektronima i time im omogućuju da pređu energetske barijeru i izađu iz metala. Pri »emisiji poljem« elektroni izlaze iz hladne elektrode tuneliranjem kroz energetske barijeru pod utjecajem električnog polja velike jakosti (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 674).

Gibanje elektrona u električnom polju. U elektronkama se djelovanje električnog polja iskorištava na više načina, npr. za ubrzavanje, otklanjanje i kočenje elektrona. Sila kojom električno polje djeluje na električni naboj q iznosi

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}, \quad (5)$$

gdje je $\vec{F}$ vektor sile, a $\vec{E}$ vektor jakosti električnog polja. Naboj koji se može slobodno gibati biva u električnom polju ubrzan, pa sila koja na njega djeluje iznosi prema drugom Newtonovom zakonu: $F = m \cdot a$, gdje m znači masu naboja, a a vektor ubrzanja. Pri tome dobiva naboj kinetičnu energiju $m v^2/2 = q U_A$, gdje U_A znači razliku potencijala između elektroda. Naboj koji se u elektronskim cijevima kreće čine emitirani elektroni, čiji je naboj $q = -q_0 \approx -1,602 \cdot 10^{-19}$ As, a masa mirovanja $m_0 \approx 9,107 \times 10^{-31}$ kg. Na kraju svog gibanja elektron postiže brzinu

$$v = \sqrt{\frac{2 q_0}{m_0}} U_A. \text{ Pri visokim naponima elektrodâ, elektroni mogu}$$

u elektronkama postići brzine veličinskog reda brzine svjetla c . U tom slučaju postaje osjetljiva relativistička promjena mase, pa treba silu izraziti s pomoću vremenske promjene impulsa:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} (m \cdot \vec{v}). \quad (6)$$

Ta se pojava, međutim, može u velikoj većini slučajeva zanemariti; npr. kad je $v = 0,14 c$ (što se postiže pri potencijalnoj razlici $U_A = 51\,000$ V), masa se elektrona poveća tek za 1%.

Ponašanje elektrona u električnom polju može se (dvodimenzijski) simulirati na elektromehaničkom sistemu koji se sastoji od horizontalno razapete membrane, koja odgovara profilu električnog polja u međuelektrodnom prostoru, od elektroda, na kojima vlada određeni napon i koje su postavljene na membranu, i od metalnih kuglica položenih na membranu. Kuglice se kreću po napetoj membrani u smjeru (silnica) električnog polja, ukoliko njihovo gibanje nije suviše brzo. Određivanje putanje elektrona i utvrđivanje oblika električnog polja može se izvesti i s pomoću elektrolitske kade, tj. posude punjene vodljivom tekućinom u koju su zaronjene elektrode. U elektrolitskoj je kadi raspodjela struje analogna raspodjeli električnog polja u međuelektrodnom prostoru kad su oblik i raspored elektroda u kadi i u simuliranom elementu jednaki.

Gibanje elektrona u magnetskom polju. Elektroni se u magnetskom polju često gibaju po neobičnim putanjama. Magnetsko polje indukcije B djeluje na česticu naboja q_0 , koja se tim poljem kreće brzinom v , silom koja je jednaka

$$F = q_0 \cdot B \cdot v \sin \alpha,$$

gdje α znači kut između smjera brzine i smjera magnetskog polja. Sila $\vec{F}$ kojom magnetsko polje djeluje na elektron u svakoj tački njegove putanje okomita je na smjer gibanja (vektor brzine $\vec{v}$)

i okomita na smjer magnetskog polja (vektor indukcije $\vec{B}$). U dva ekstremna slučaja dobiju se putanje opisane u daljem izlaganju. Ako se u homogenom magnetskom polju smjer gibanja (vektor brzine $\vec{v}$) poklapa sa smjerom magnetskog polja (vektorom indukcije $\vec{B}$), kut $\alpha = 0$, pa je prema jedn. (6) sila $\vec{F} = 0$ i putanja elektrona ostaje pravolinijska. Ako je vektor brzine $\vec{v}$ okomit na smjeru polja, $\alpha = 90^\circ$, dobiva se kružna putanja u ravnini koja je okomita na smjer magnetskih silnica. U drugim se slučajevima dobiju različite helikoidne putanje.

Veličina sile $\vec{F}$ i smjer njezina djelovanja mogu se najbolje izraziti vektorskim produktom ($\vec{B} \times \vec{v}$) u vektorskoj jednadžbi

$$\vec{F} = q_0 (\vec{B} \times \vec{v}). \quad (7)$$

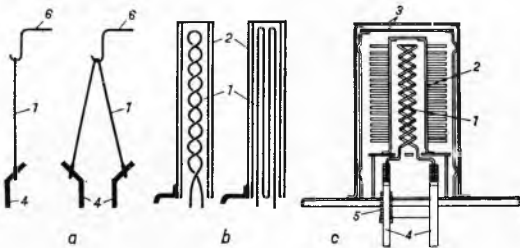
Kad na elektron koji se kreće u elektroni djeluju zajedno električno i magnetsko polje, mogu se ostvariti vrlo komplicirane putanje (npr. cikloide, v. *Elektronska optika*).

Izrazi (5), (6) i (7) predstavljaju jednadžbe gibanja elektrona iz kojih se njegova putanja može odrediti samo u jednostavnim slučajevima. Za nešto složenije slučajeve, kakvi su među-elektrodni sistemi u elektronkama, analitičko rješenje tih jednadžbi u općem slučaju nije moguće.

Ovisnost jakosti struje kroz elektronsku cijev o naponima na različitim njenim elektrodama često je komplicirana funkcija i ne može se prikazati u prikladnom analitičkom obliku. Stoga se ta ovisnost predočava radije grafički pomoću nekoliko vrsta karakteristika za svaki pojedini tip elektronke. Snimanje tih ovisnosti provodi se najčešće istosmjernim naponima i strujama pod statičkim uvjetima (*statičke karakteristike*).

Vakuum u elektronkama. Ako je među-elektrodni sistem smješten u staklenu, metalnu ili keramičku posudu (balon) iz koje je ispušan zrak do pritiska ispod 10^{-6} mmHg, radi se o *vakuumskim elektronskim cijevima*. Poboljšanje vakuuma postiže se pomoću tzv. getera, koji se nakon evakuacije zraka induktivno zagrije i napari na stijenke cijevi, vežući uza se molekule plina koje su u njoj zaostale u toku proizvodnje, a i kasnije. Kao geter služi često magnezijum ili barijum. Kad je među-elektrodni sistem smješten u atmosferu inertnog plina ili živinih para pritiska 10^{-4} do 10^{-1} mmHg, radi se o *plinom punjenim elektronskim cijevima*. U njima dolazi do ionizacije plina, ali nosioci struje ostaju i dalje elektroni.

Termionska emisija katode. Elektronke koje rade s pomoću termionske emisije imaju užarenu elektrodu, zvanu katoda, od materijala koji može dati velik broj elektrona za termionsku struju.



Sl. 28. Različite izvedbe katode: a direktno žarena, b indirektno žarena, c katoda plinom punjene cijevi; 1 žarna nit, 2 pločica s oksidnim slojem, 3 zaštitni plašt, 4 dovodi, 5 izolacija, 6 opružni držači

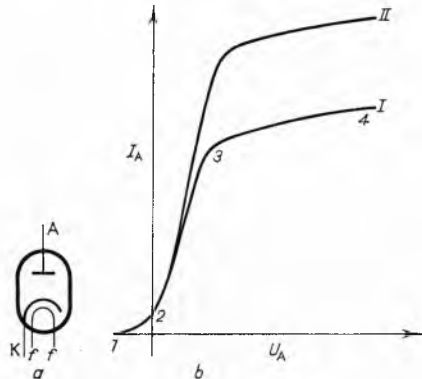
Gustoća (površinska) termionske struje emisije (najveća vrijednost struje po jedinici površine katode pod uvjetima zasićenja) J_s dobiva se iz tzv. Dushmanove jednadžbe (1922, ponekad zvane i Richardsonovom jednadžbom)

$$J_s = A T^2 e^{-b/T}, \quad (8)$$

u kojoj su A i b konstante tipične za pojedini materijal, a T apsolutna temperatura. Katoda se žari pomoću struje žarenja koja prolazi ili direktno kroz katodu (*direktno žarena katoda*) ili kroz žarnu nit koja je izolirana od same katode (*indirektno žarena katoda*). Direktno žarene katode od volframa ili volframa prekrivena tankim slojem torijuma (toriranog volframa) upotrebljavaju

se za vakuumske elektronske cijevi koje rade pod visokim naponima ili za elektronke punjene plinom. Radna temperatura katode iznosi za katode od volframa 2400...2600 K, a za katode od toriranog volframa 1900 K. Za napone ispod 1000 V upotrebljavaju se u vakuumskim cijevima, a djelomično i u plinom punjenim cijevima, indirektno žarene katode prekrivene slojem barijum- ili stroncijum-oksida (BaO , SrO), koje daju veću emisiju struju ($0,4 \dots 3 \text{ A/cm}^2$). Radna temperatura im leži između 1000 i 1100 K. Na sl. 23 prikazano je nekoliko tipova direktno i indirektno žarenih katoda.

Vakuumska dioda. Najjednostavnija vakuumaska termionska cijev je dioda; ona osim katode ima još samo jednu elektrodu zvanu anoda. Simbol diode s indirektno žarenom katodom prikazuje sl. 29 a. Anoda se izrađuje od nikla, molibdena ili grafita (kad se radi o diodi za veće snage) i najčešće je u obliku šupljeg cilindra kroz čiju os prolazi katoda (cilindrična dioda). Kad je anoda na pozitivnom potencijalu U_A u odnosu prema katodi, elektroni emitirani iz katode stižu na anodu pa teče znatna anodna struja I_A ; uz negativne anodne napone elektroni ne mogu stići na anodu, i zato dioda propušta struju samo u jednom smjeru, tj. djeluje kao ventil. Ovisnost struje o naponu, $I_A = f(U_A)$, prikazuje se karakteristikom diode, čiji se izgled vidi na sl. 29 b.



Sl. 29. Dioda i njezina karakteristika. a Simbol diode, b karakteristika diode; A anoda, K katoda, ff žarno vlakno, 1...2 područje početka protjecanja, 2...3 područje prostornog naboja, 3...4 područje zasićenja

Krivulja I važi za manju struju žarenja, krivulja II za veću. Područje karakteristika između tačaka 1 i 2 je *područje početka protjecanja*, u kojem je ukupni napon između anode i katode, uključujući i kontakti potencijal, negativan. Mala anodna struja ipak teče zbog početnih brzina elektrona emitiranih iz katode. U tom je području ovisnost struje anode I_A o anodnom naponu U_A dana za slučaj cilindrične diode izrazom

$$I_A = I_s \sqrt{\frac{4 |U_R|}{\pi U_T}} \exp \frac{U_A}{U_T}, \quad (9)$$

gdje je I_s struja emisije katode, a U_T naponski ekvivalent temperature katode (zvan također temperaturni napon), tj.

$$U_T = \frac{kT}{q_0}. \quad (10)$$

(k je Boltzmannova konstanta, T je apsolutna temperatura). Ako se za k i q_0 uvrste numeričke vrijednosti $k = 1,38 \, 041 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ i $q_0 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$, dobiva se numerička relacija $U_T = T/11 \, 605$, kojom se iz temperature T u kelvinima može izračunati U_T u voltima. Izraz (9) vrijedi samo za $U_A < 0$ i $|U_A| \ll U_T$. Veličina U_R je rezultirajući retardirajući napon između anode i katode određen izrazom $U_R = U_A + \psi_{AK} = U_A + \psi_K - \psi_A$, gdje je U_A anodni napon, ψ_{AK} kontakti potencijal sistema anoda-katoda, a ψ_A i ψ_K naponski ekvivalenti rada izlaza anode i katode.

Između tačaka 2 i 3 na sl. 29 b je područje rada diode u kojem je struja ograničena tzv. prostornim nabojem; to se područje naziva *područjem prostornog naboja*.

Svugdje gdje unipolarna struja nosilaca naboja (elektrona, iona), teče kroz vakuum, stvara se u međuprostoru između katode i anode električni naboj (zbog nagomilavanja nosilaca) koji se zove prostorni naboj i koji djeluje odbojno na druge istoimene nosioce naboja, npr. na elektrone koji izlaze iz katode. Gustoća prostornog naboja ρ u As/m³ i gustoća struje I u A/m na katodi ili anodi karakteriziraju taj naboj.

Jakost struje I_A koja teče kroz elektronsku cijev pod djelovanjem prostornog naboja određena je tzv. tropolovinskim zakonom (Langmuir i Child):

$$I_A = K U_A^{3/2},$$

u kojem je K konstanta ovisna o razmaku i obliku elektroda, a U_A potencijalna razlika između anode i katode. Radi boljeg razumijevanja bit će ovaj zakon u nastavku izveden za planparalelne i koaksijalne cilindrične elektrode.

Ovisnost struje o naponu za jednostavan slučaj planparalelne geometrije (tj. kad su anoda i katoda planparalelne ploče) može se dobiti iz Poissonove diferencijalne jednačine

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (11)$$

u kojoj je ρ gustoća naboja između anode i katode a ϵ_0 je influenciona konstanta. Gustoća struje J koja postoji uslijed gibanja elektrona brzinom v iznosi

$$J = -e v, \quad (12)$$

a energija elektrona koji se giba brzinom v na mjestu na kojem je potencijal U jednaka je

$$q_0 U = \frac{1}{2} m_0 v^2. \quad (13)$$

Jednačbe (12) i (13) uvrštene u izraz (11) daju diferencijalnu jednačbu

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{1}{\epsilon_0} J \sqrt{\frac{m_0}{2 q_0}} \cdot \frac{1}{U},$$

koja se može pisati u obliku

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dU}{dx} \right)^2 = \frac{4J}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m_0}{2 q_0}} \frac{d}{dx} (U^{1/2}).$$

Dvostrukim integriranjem ovog izraza i uzimajući konstante integracije jednake nuli (jer su polje i napon na katodi, gdje je $x = 0$, jednaki nuli) dobiva se izraz

$$\frac{4}{3} U^{3/2} = \left(\frac{4J}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m_0}{2 q_0}} \right)^{1/2} x. \quad (14)$$

Ako je razmak između anode i katode jednak d , vrijedi izraz (14) za sve vrijednosti varijable x od 0 do d , jer je gustoća struje J svugdje u tom dijelu konstantna. Prema tome za $x = d$ iznosi napon $U = U_A$, te iz jedn. (14) slijedi

$$J = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2 q_0}{m_0}} \frac{U_A^{3/2}}{d^2}. \quad (15)$$

Anodna struja dobiva se iz izraza (15) množenjem gustoće struje J sa površinom S katode (i anode). Ako se uvrste numeričke vrijednosti konstanti, dobiva se za anodnu struju planparalelne diode brojčana jednačba

$$I_A = J S = 2,33 \cdot 10^{-4} \frac{S}{d^2} U_A^{3/2}, \quad (16)$$

koja daje struju u amperima ako se U_A izrazi u voltima, a S i d^2 u kvadratnim centimetrima.

Na sličan način može se izvesti ovisnost struje o naponu za cilindričnu diodu, kojoj su anoda i katoda dužine l i polumjera r_A , odnosno r_K . U tom slučaju dobiva se jednačba

$$I_A = \frac{8\pi\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2 q_0}{m_0}} \frac{l}{r_A r_K^2} U_A^{3/2},$$

iz koje se nakon uvrštenja numeričkih vrijednosti dobije brojčana jednačba

$$I_A = 14,68 \cdot 10^{-4} \frac{l}{r_A r_K^2} U_A^{3/2}. \quad (17)$$

Ovaj izraz daje struju u amperima ako je napon U_A uvršten u voltima, a linearne dimenzije l i r_A u bilo kakvim jednakim jedinicama. U ovom je izrazu β^2 parametar koji ovisi o omjeru r_A/r_K i ne razlikuje se znatno od 1 kad je ovaj omjer veći od 10. Izrazi (16) i (17) pokazuju da se, neovisno o geometriji, struja u području prostornog naboja pokorava tropolovinskom zakonu.

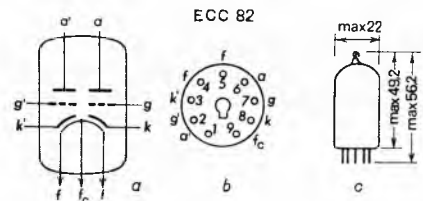
Između tačaka 3 i 4 na sl. 29 b nalazi se područje rada diode, koje se naziva *područje zasićenja*; u tom je području struja kroz diodu ograničena mogućnostima katode da emitira elektrone, a ne prostornim nabojem, što znači da svi elektroni koji izlaze iz katode stižu na anodu. Poveća li se povećanjem struje žarenja temperatura katode (krivulja II na sl. 29 b), struja u području

zasićenja znatno poraste. U područjima 1—2 i 2—3, naprotiv, povišenje temperature ne djeluje znatno na struju.

Vakuumska dioda se najčešće upotrebljava za demodulaciju visokofrekventnih signala i za ispravljanje izmjenične struje. Često se dvije identične diode ugrađuju u jedan stakleni balon, jer takav sistem omogućuje punovalno ispravljanje. Obje diode imaju istu katodu, pa se takva cijev zove *duodiode*.

Elektronke s upravljanjem gustoćom struje

Trioda. Upravljanje tokom elektrona između katode i anode postiže se u triodi (tj. u elektronici sa tri elektrode, sl. 31 a) tako da se između anode i katode umetne elektroda u obliku mrežice ili spirale od tanke žice. Elektroni mogu prolaziti kroz ovu elektrodu, zvanu (upravljačka) rešetka, ali napon doveden na rešetku djeluje na elektrone tako da anodna struja ovisi ne samo o anodnom naponu već i o naponu rešetke. Kako je udaljenost



Sl. 31. Dvostruka trioda ECC 82. a Simbol, b raspored priključnih nožica, c dimenzije

rešetke od katode znatno manja nego udaljenost katode od anode, utjecaj je napona rešetke na struju kroz elektronsku cijev znatno veći od utjecaja anodnog napona. Stoga već male promjene napona rešetke izazivaju velike promjene struje, zbog čega se trioda može upotrijebiti za pojačanje. Napon je rešetke u odnosu prema katodi najčešće negativan. Omjer negativnog napona rešetke U_G i pozitivnog anodnog napona U_A pri kojemu se elektrostatika polja na mjestu katode upravo potiru zove se *elektrostatički faktor pojačanja* μ . Ako je razmak između rešetke i katode malen, polje uz katodu nije homogeno, i zato se kao faktor pojačanja definira omjer malih prirasta anodnog napona i napona rešetke koji su takvi da anodna struja ostaje nepromijenjena. Pišući male priraste u diferencijalnom obliku, definicija elektrostatičkog faktora pojačanja triode glasi

$$\mu = - \left(\frac{\partial U_A}{\partial U_G} \right) I_A = \text{konst.}$$

Do izraza za anodnu struju triode u ovisnosti o naponima U_A i U_G dolazi se svodenjem triode na ekvivalentnu diodu i definiranjem efektivnog potencijala U_{et} , tj. potencijala koji bi trebalo da ima masivna elektroda na mjestu rešetke da bi homogeni dijelovi polja na anodi i katodi ostali nepromijenjeni. Za svaku triodu, bez obzira na geometriju, efektivni potencijal iznosi

$$U_{et} = \sigma \left(U_G + \frac{U_A}{\mu} \right),$$

gdje je μ faktor pojačanja, a σ konstanta ovisna o dimenzijama i razmaku elektroda. Ona iznosi npr. za triodu s cilindričnim elektrodama

$$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{2}{3} \ln \frac{r_A}{r_G} \right)}.$$

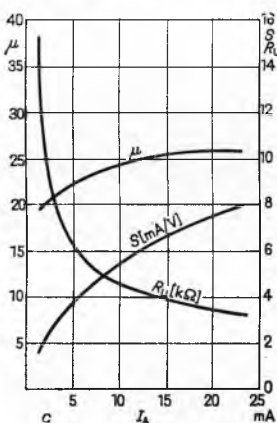
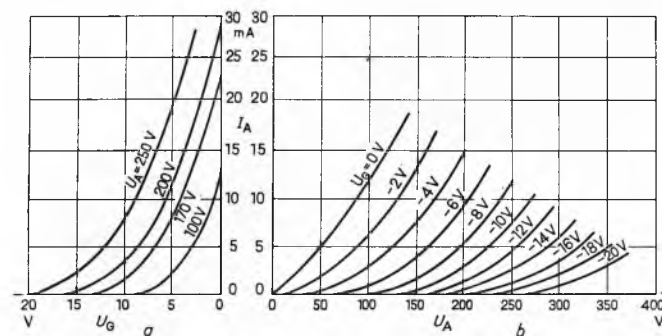
Struja kroz triodu, kad ona radi u području prostornog naboja, jednaka je vrijednosti koja se dobiva iz izraza (17) za struju diode, ako se uvrsti efektivni potencijal umjesto anodnog napona i napona rešetke i ako se uzme u obzir da ekvivalentnu diodu čine katoda i elektroda na mjestu rešetke. Tako se dobiva brojčana jednačba

$$I_A = 14,68 \cdot 10^{-4} \frac{l}{r_G r_A^2} U_{et}^{3/2}.$$



Sl. 30. Dioda za ispravljanje visokih napona

Anodna struja triode funkcija je dvaju napona i može se prikazati poljem karakteristika u kojem je jedan napon nezavisna varijabla a drugi napon parametar. Sl. 32 a prikazuje prenosne



Sl. 32. Karakteristike triode i ovisnost njenih parametara. a) Prenosna karakteristika triode $I_A = f(U_G)$ uz $U_A = \text{konst.}$, b) izlazna karakteristika $I_A = f(U_A)$ uz $U_G = \text{konst.}$, c) ovisnost parametara o anodnoj struji I_A

karakteristike triode, koje daju ovisnost anodne struje I_A o naponu rešetke U_G uz anodni napon U_A kao parametar, a sl. 32 b prikazuje izlazne karakteristike, u kojima je anodni napon nezavisna varijabla, a napon rešetke parametar. Moguć je i treći prikaz karakteristika, koji daje ovisnost napona rešetke o anodnom naponu za stalnu anodnu struju; takve karakteristike triode upotrebljavaju se za elek-

tronke koje rade pri velikim strujama.

Osim faktora pojačanja μ karakteristični su parametri triode strmina S i unutarnji otpor r_u koji su definirani izrazima

$$S = \left(\frac{\partial I_A}{\partial U_G} \right)_{U_A = \text{konst.}}$$

$$r_u = \left(\frac{\partial U_A}{\partial I_A} \right)_{U_G = \text{konst.}}$$

Prema ovoj definiciji *strmina* je nagib prenosne karakteristike, a *unutarnji otpor* je recipročna vrijednost nagiba izlazne karakteristike pri određenoj vrijednosti anodne struje i napona. Vrijednosti parametara ovise su o anodnoj struji, kao što se to vidi iz sl. 32 c. Faktor je pojačanja μ za idealnu triodu konstantan. Faktor pojačanja μ realne triode, u kojoj razmak žica rešetke nije idealno jednak niti je sistem idealno koncentričan, nešto se mijenja sa promjenom struje. Strmina i unutarnji otpor triode u znatnoj su mjeri ovisni o struji.

Sa tako definiranim parametrima triode može se ukupna promjena anodne struje dobiti ako se diferencira izraz za anodnu struju $I_A = f(U_A, U_G)$:

$$dI_A = \frac{\partial I_A}{\partial U_G} dU_G + \frac{\partial I_A}{\partial U_A} dU_A = S dU_G + \frac{1}{r_u} dU_A. \quad (18)$$

Za promjenu anodne struje jednaku nuli ($dI_A = 0$) vrijedi prema jedn. (18).

$$-\frac{dU_A}{dU_G} = S r_u, \quad (19)$$

a budući da je u tom slučaju $\frac{dU_A}{dU_G} = \frac{\partial U_A}{\partial U_G}$, izraz (19) poprima oblik

$$\mu = S \cdot r_u,$$

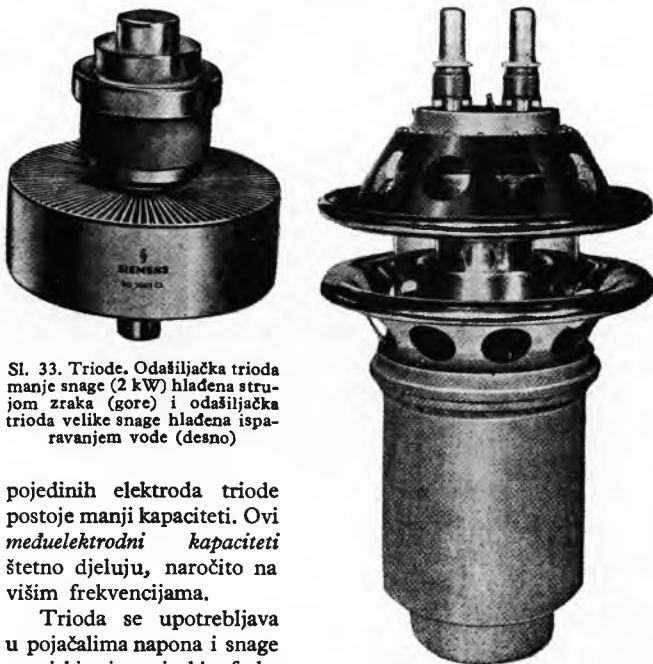
koji se zove *Barkhausenova relacija*. Ta jednadžba daje ovisnost između parametara triode i omogućuje da se iz dva poznata parametra odredi treći.

Male promjene anodne struje i napona rešetke i anode mogu se shvatiti kao izmjenične komponente male amplitude superponirane istosmjernim vrijednostima. Zato se za izmjeničnu komponentu anodne struje i_a prema izrazu (18) može pisati

$$i_a = S u_g + \frac{1}{r_u} u_a,$$

tako da se trioda može prikazati ekvivalentnim sklopom naponskog generatora $S u_g$ spojenog paralelno otporu r_u . Tipične vrijednosti parametara trioda za male snage jesu: $S \approx 1 \text{ mA/V}$, r_u desetak $k\Omega$, a $\mu \approx 20$.

Rešetka triode je najčešće na negativnom potencijalu (u odnosu prema katodi) i tada je *struja rešetke* vrlo mala, a nastaje uslijed struje početka protjecanja (analogne toj struji kod diode u području negativnih anodnih napona), ionske struje uslijed ostataka plina u cijevi, izolacione struje uslijed konačnog otpora izolacije između rešetke, katode i anode, i termionske struje do koje dolazi jer je rešetka uslijed blizine katode također zagrijana. Kad trioda radi sa pozitivnim naponima rešetke, struje rešetke su znatne, jer rešetka u tom slučaju izravno privlači elektrone. Između

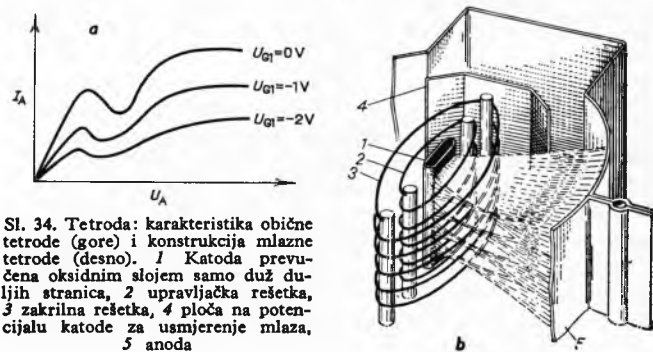


Sl. 33. Triode. Odašiljačka trioda manje snage (2 kW) hladena strujom zraka (gore) i odašiljačka trioda velike snage hladena isparavanjem vode (desno)

pojedinih elektroda triode postoje manji kapaciteti. Ovi *meduelektrodni kapaciteti* štetno djeluju, naročito na višim frekvencijama.

Trioda se upotrebljava u pojačalima napona i snage na niskim i na visokim frekvencijama. Trioda manje snage, hladena zrakom, prikazana je na sl. 33 lijevo, a trioda za velike snage, koja se upotrebljava u odašiljačima, a hladena je isparavanjem vode, na sl. 33 desno.

Tetroda je cijev koja ima dvije rešetke, od kojih prva, zvana upravljačka rešetka, ima istu funkciju kao i rešetka triode, a druga, zvana *zakrilna rešetka*, elektrostatički zakriljuje anodu od upravljačke rešetke, uslijed čega se smanjuje njihov meduelektrodni kapacitet. U ovoj cijevi dolazi zbog udaranja brzih elektrona o elektrode do sekundarne emisije elektrona iz anode i iz zakrilne rešetke, i zato je karakteristika I_A, U_A (sl. 34 a) u jednom svom

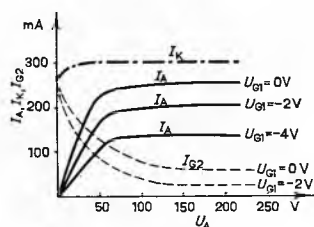


Sl. 34. Tetroda: karakteristika obične tetrode (gore) i konstrukcija mlazne tetrode (desno). 1 Katoda prevučena oksidnim slojem samo duž dužljih stranica, 2 upravljačka rešetka, 3 zakrilna rešetka, 4 ploča na potencijalu katode za usmjerenje mlaza, 5 anoda

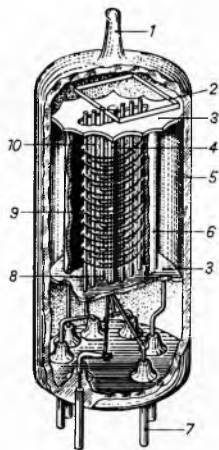
dijelu udubljena. Opadanje anodne struje pri porastu anodnog napona potječe u tom dijelu karakteristike od toga što veći broj elektrona napušta anodu uslijed sekundarne emisije i odlazi na zakrilnu rešetku. Tetroda se uglavnom primjenjuje kao pojačalo velikih snaga na višim frekvencijama.

Udubljenje karakteristike, a time i »negativni otpor« (tj. pojava da višem naponu odgovara manja struja) uklanja se u *mlaznim tetrodama* (sl. 34 b) takvim rasporedom elektroda da se između anode i zakrilne rešetke stvori prostorni naboj elektrona, koji sprečava odlazak sekundarnih elektrona na zakrilnu rešetku.

Pentoda ima tri rešetke, dakle s katodom i anodom ukupno pet elektroda. Uz upravljačku i zakrilnu rešetku umetnuta je između anode i zakrilne rešetke još i *kočna rešetka*, koja se nalazi na potencijalu katode; zakrilna je rešetka, kao i u tetrodi, na visokom pozitivnom potencijalu. Kočna rešetka onemogućuje prelaz sekundarnih elektrona s anode na zakrilnu rešetku, ali omogućuje primarnim elektronima, koji imaju znatno veću energiju, da prođu kroz nju na svom putu od katode na anodu. Ukupna struja I_K koju daje katoda pentode jednaka je zbroju anodne struje I_A i struje zakrilne rešetke I_{G2} (sl. 35). Struja I_K je gotovo neovisna o anodnom naponu, jer pri malim anodnim naponima većinu te struje preuzima zakrilna rešetka, a s porastom anodnog napona anodna struja brzo raste sve dok anoda ne preuzme većinu struje. Daljim porastom anodnog napona anodna struja se malo povećava, pa zbog toga pentoda ima velik unutarnji otpor ($\sim 1 \text{ M}\Omega$).



Sl. 35. Pentoda; konstrukcija (desno) karakteristike pentode (gore). 1 Zatallena cijev za evakuiranje zraka, 2 geter, 3 držač od izolacionog materijala, 4 katoda, 5 stakleni balon, 6 anoda, 7 priključne nožice, 8 upravljačka rešetka, 9 kočna rešetka, 10 zakrilna rešetka



Utjecaj anodnog napona na polje pred katodom je malen, pa je i faktor pojačanja μ pentode znatno veći nego faktor pojačanja triode. Pentode koje se upotrebljavaju za pojačanje napona na visokim frekvencijama imaju gusto namotanu zakrilnu rešetku, da bi kapacitet između anode i upravljačke rešetke bio što manji. U *regulacionim pentodama* za prijemnike upravljačka je rešetka motana nejednolikim korakom (u sredini rjeđe a na krajevima gušće). Zbog toga μ , S i r_u znatno ovise o prednaponu na toj rešetki, pa se takve pentode mogu primijeniti za automatsku kontrolu pojačanja. *Pentode za pojačanje snage* na niskim frekvencijama imaju rijetko motanu zakrilnu rešetku, da bi struja te elektrode bila što manja u odnosu prema korisnoj anodnoj struji.

Heksoda je cijev sa četiri rešetke: dvije upravljačke (prva i treća) i dvije zakrilne (druga i četvrta), dakle sa ukupno šest elektroda, a upotrebljava se za miješanje signala koji se dovode upravljačkim rešetkama (v. *Elektronika, uređaji*).

Heptoda ima jednu rešetku više nego heksoda, jer je između druge zakrilne rešetke i anode dodana kočna rešetka. Ova elektronka služi za iste svrhe kao i heksoda. Cijev sa pet rešetki može biti građena i tako da elektrode čine sistem za dobivanje oscilacija i za miješanje tako nastalog napona s naponom koji se dovodi na jednu od rešetki. Takva cijev (engl. pentagrid convertor) radi jednako kao i *oktoda*, koja ima šest rešetki.

Kombinirane elektronke. Elektronke manjih snaga (cijevi za prijemnike) načinjene su često tako da se u isti stakleni balon smjeste dva ili više elektrodnih sistema, npr. dvije triode, trioda i pentoda, trioda i heptoda i sl. Sve elektrode učvršćene

su na metalne držače koji prolaze kroz dno ili vrh staklenog balona i ujedno predstavljaju električne dovode. Svi nosači učvršćeni su jedni na druge pomoću pločica od tinjca. Katoda se izrađuje od niklene cjevčice na koju je nanesen oksidni sloj, rešetka je spiralno motana žica, a anoda je cilindrična oblika često povećane površine, da bi odvod topline bio bolji. Tipične dimenzije modernih elektronki za prijemnike jesu: visina $\sim 50 \text{ mm}$ i promjer $\sim 20 \text{ mm}$ (v. sl. 31 c). Cijevi nose na sebi oznaku od slova i brojki, kojom se označava napon žarenja katode, vrste i broj elektrodnih sistema smještenih u balonu i vrsta podnožja (priključaka) u koje se takva cijev može utaknuti. Evropski proizvođači cijevi za prijemnike pridržavaju se oznaka prema tabl. 4. Cijevi napravljene u USA i SSSR nose drukčije oznake.

Tablica 4
OZNAKE PRIJEMNIH ELEKTRONSKIH CIJEVI

Prvo slovo: oznaka žarenja	Drugo i preostala slova oznaka su elektrodnog sistema	Prva znamenka iza slova označuje tip podnožja
A 4 V i	paralelno napajanje	A dioda
C 200 mA	serijsko napajanje	B duodioda (dvije diode)
D 1,4 V d 0,625 V	paralelno napajanje	C trioda
E 6,3 V i	paralelno napajanje	D izlazna trioda
F 12,6 V i	paralelno napajanje	E tetroda
G 5 V i	paralelno napajanje	F pentoda
K 2 V d	paralelno napajanje	H heksoda ili heptoda
P 300 mA	serijsko napajanje	K oktoda
U 100 mA	serijsko napajanje	L izlazna pentoda
V 50 mA	serijsko napajanje	M pokazivačka cijev
		Y dioda za ispravljač
		Z duodioda za ispravljač
		1 Različita podnožja
		2 Loktal
		3 Oktal
		4 Rimlock
		5 Loktal 9 polni
		6 Subminijatur
		8 Noval
		9 Minijatur
		druga i eventualno treća znamenka znače redni broj

d direktno grijanje, i indirektno grijanje

Primjer: PCF 80: žarenje istosmjernom ili izmjeničnom strujom 300 mA u serijskom spoju napajanja, trioda i pentoda, podnožje noval iz serije rednog broja nula.

ECC 82: žarenje izmjeničnom strujom napona 6,3 V u paralelnom spoju s drugim cijevima, dvostruka trioda, podnožje noval iz serije rednog broja 2 (v. sl. 31).

Elektronke poboljšane konstrukcije predstavljaju *cijevi s okvirnom rešetkom*, tj. s rešetkom izrađenom od žica napetih između dva čvrsta nosača. Razmak između rešetke i katode može se na taj način bolje kontrolirati i znatno smanjiti, čime se dobiva veća strmina.

Nuvisori se konstrukcijom znatno razlikuju od ostalih vrsta elektronskih cijevi. Oni su napravljeni tako da svaka elektroda sa svojim držačima čini čvrstu cjelinu. Svi spojevi zavareni su na povišenoj temperaturi u atmosferi vodika. Držači elektroda, keramičko dno i metalni plašt posude omogućuju dobar odvod topline, osiguravaju trajan i dobar vakuum i bez getera, te daju dug i pouzdan rad i unatoč znatno smanjenim dimenzijama ($15 \times 15 \text{ mm}$), a podnose i veća strujna opterećenja.

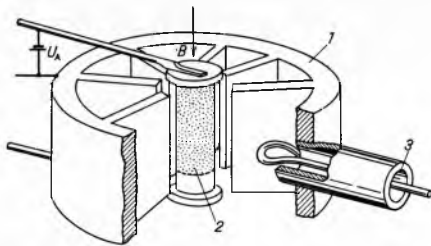
Elektronke za vrlo visoke frekvencije. Na vrlo visokim frekvencijama (60–90 MHz) elektronke obične izvedbe više nisu upotrebljive ni u pojačalima ni u oscilatorima. Na tim frekvencijama dolazi, naime, sve više do izraza djelovanje interelektrodnih kapaciteta, velika induktivnost dovoda, povećani gubici, a vrijeme preletanja elektrona od katode do anode više se ne može zanemariti, kao na nižim frekvencijama, s obzirom na to da ono pada u isti veličinski red kao trajanje jedne periode visokofrekventnog napona. U vezi s time dolazi, naime, do poremećaja u fazi i do prevelike apsorpcije energije na rešeci. Stoga je razvijen niz različitih tipova elektronki koje rade po klasičnom principu uprav-

ljanja tokom elektrona s pomoću rešetke (npr. elektronke koje se zbog svog oblika nazivaju »svjetioničke cijevi«) ali imaju pločaste elektrode, što manji interelektrodni kapacitet i smanjeni induktivitet. Njihove elektrode obično sačinjavaju dio oscilatornog kruga, itd. Međutim, ni takve elektronke nisu više efikasne na frekvencijama iznad 3000 MHz. U tom se području primjenjuju posebne elektronske cijevi koje rade po posve drugom principu, tj. po principu razmjene energije između elektroda, rezonatora i elektronskog snopa.

O šumu u elektronkama v. poglavlje Šum u članku *Elektronika, uređaji*.

Elektronke s upravljanjem brzinom elektrona

Magnetron (sl. 36) sastoji se od cilindrične katode koja emitira elektrone i oko nje koncentrično smještene cilindrične anode sa šupljinama koje predstavljaju rezonatore. Duž osi magnetrona djeluje magnetsko polje, tako da elektroni koji izlaze iz katode ne putuju zbog električnog polja radijalno prema anodi (koja je pozitivna u odnosu prema katodi), već ih magnetsko polje skreće u stranu tako da dobivaju tangencijalne komponente brzine. Prolazeći pokraj rezonatora, elektroni mu predaju dio svoje energije, jer nailaze na visokofrekventno električno polje koje ih usporava. Na taj se način podržavaju visokofrekventne oscilacije u rezonatorima. Sistem je podešen tako da elektroni koji dolaze do rezonatora i bivaju ubrzani, tj. ne podržavaju oscilacije već ih guše, odlaze natrag na katodu, a elektroni koji predaju svoju energiju rezonatoru odlaze na anodu, ali na tom svom putu još predaju dio energije i drugim rezonatorima. Tako je ukupna energija koja se predaje rezonatorima veća od one koja se od njih prima, pa se zbog toga oscilacije podržavaju. Na jednom od rezonatora priključen je koaksijalni kabel ili valovod pomoću kojeg se visokofrekventna energija odvodi do trošila (npr. antene). Magnetron se



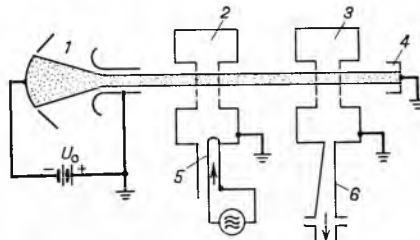
Sl. 36. Shematski prikaz magnetrona. 1 Anoda, 2 katoda, 3 koaksijalna linija na izlazu

upotrebljava kao oscilator snage na frekvencijama od $\sim 1,5$ GHz ($\lambda = 20$ cm) do ~ 15 GHz ($\lambda = 2$ cm). Veliku (impulsnu) snagu, i do 4 MW, magnetron može dati zahvaljujući visokim anodnim naponima (i do 50 kV). Magnetroni se upotrebljavaju kao izvori struja ekstremno visoke frekvencije u radio- i radarskim odašiljačima i elektrotermijskim uređajima.

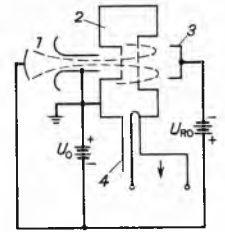
Klistron sa dva rezonatora (sl. 37) sastoji se od elektronskog topa 1, ulaznog rezonatora 2, međuprostora između dva rezonatora, izlaznog rezonatora 3 i kolektora 4. Snopom se u klistronu upravlja time što se mijenja brzina njegovih elektrona. Snop elektrona, koji izlazi iz elektronskog topa jednolikom brzinom, biva istosmjernim poljem ubrzan, jer je potencijal rezonatora viši od potencijala katode. Kad snop uđe u ulazni rezonator, na njega djeluje izmjenično upravljačko elektromagnetsko polje, pa njegovi elektroni, ovisno o fazi upravljačkog signala, primaju ili predaju energiju polju u rezonatoru i bivaju pri tome ubrzani ili usporani. U prosjeku se jednaka energija prima i predaje elektronskom snopu, tako da ulazni signal ne troši nikakvu snagu. Na izlazu iz prvog rezonatora ulaze brzinski modulirani elektroni u međuprostor između ulaznog i izlaznog rezonatora, gdje brži elektroni stišu ranije usporene elektrone. Time se stvara tok elektrona različite gustoće, koji ulazi u drugi, izlazni rezonator 3. Tako grupirani elektroni (gustinski modulirani) pobuđuju influencijom taj rezonator na osciliranje, predajući mu svoju energiju. Pojačani signal može se iz izlaznog rezonatora odvoditi s pomoću valovoda ili koaksijalnog kabela. Takav klistron služi, dakle, za pojačanje snage i do preko 5 kW u području 0,2...10 GHz. Elektroni koji

prođu kroz drugi rezonator zaustavljaju se na posebnoj elektrodi (kolektoru), kojoj predaju ostatak svoje energije, pa se kolektor znatno zagrijava. Klistron može služiti i kao oscilator ako se uspostavi povratna veza između izlaznog i ulaznog rezonatora. I kad klistron služi kao pojačalo, i kad služi kao oscilator, njegov ulazni i njegov izlazni rezonator ugođeni su na istu frekvenciju. Struja snopa elektrona, međutim, sadrži i više harmonike, pa ako je izlazni rezonator ugođen na frekvenciju koja je višekratnik rezonantne frekvencije ulaznog rezonatora, klistron djeluje i kao umnožak frekvencija.

Postoje i klistroni s više rezonatora. Dodatni rezonatori, jedan ili više njih, uvrštavaju se između ulaznog i izlaznog rezonatora. Time se postiže veće pojačanje, veća izlazna snaga, veća korisnost i šire frekvencijsko područje.



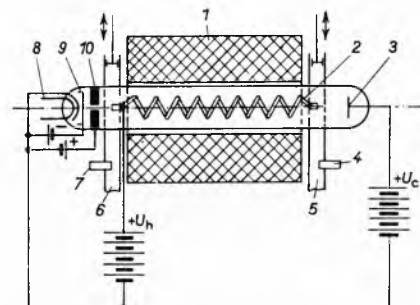
Sl. 37. Shematski prikaz klistrona sa dva rezonatora. 1 Elektronski top, 2 ulazni rezonator, 3 izlazni rezonator, 4 kolektor, 5 ulazna koaksijalna linija, 6 izlazni valovod



Sl. 38. Refleksni klistron, shematski prikaz. 1 Elektronski top, 2 rezonator, 3 reflektirajuća elektroda, 4 izlazni koaksijalni vod

Refleksni klistron ima samo jedan rezonator koji služi za proizvodnju oscilacija (sl. 38). Elektroni koji izlaze iz katode bivaju ubrzani i ulaze jednolikom brzinom u taj rezonator. Elektromagnetsko polje koje ovdje postoji ubrzava ili usporava ih, već prema svojoj fazi. Elektroni, koji su sada različitih brzina, produžuju put prema reflektirajućoj elektrodi. Ona se nalazi na negativnom potencijalu, pa stoga elektrone vraća u rezonator. Napon reflektirajuće elektrode odabire se tako da i ubrzani elektroni, koji stižu bliže reflektirajućoj elektrodi i zato prevaljuju duži put, i oni elektroni koji su usporeni pri prvom prolasku kroz rezonator, stižu istovremeno natrag u rezonator i to upravo u trenutku kad ih polje u njemu usporava. Na taj način grupirani elektroni predaju svoju energiju rezonatoru i podržavaju u njemu oscilacije. Podešavanje frekvencije (do 1%) postiže se promjenom napona reflektirajuće elektrode, do 10% mehaničkim deformiranjem oscilatora. Refleksni klistroni daju do 10 W snage u području od 1 do 50 GHz, a upotrebljavaju se kao oscilatori mjernih generatora, modulatora i prijemnika.

Cijev s putujućim valom razlikuje se od klistrona po tome što elektronski snop putuje ovdje zajedno s elektromagnetskim valom, pa oni cijelo vrijeme djeluju jedan na drugi. Elektro-



Sl. 39. Shematski prikaz elektronke s putujućim valom. 1 Zavojnica za magnetsko fokusiranje snopa elektrona, 2 helikoidno savijen vodič, 3 kolektor, 4 i 7 vijci za prilagodavanje, 5 izlazni valovod, 6 ulazni valovod, 8 katoda, 9 rešetka (Wehneltov cilindar), 10 anoda

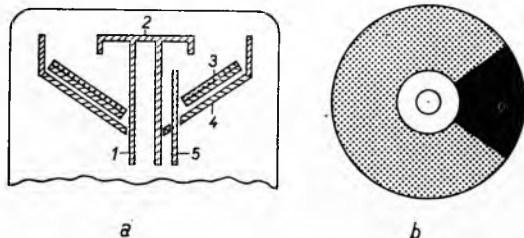
magnetski val koji se dovodi iz valovoda na početak helikoidno savijenog vodiča (sl. 39) putuje duž njega i na njegovom kraju prelazi pojačan opet u valovod. Helikoidni vodič djeluje ovdje

kao usporavajući vod; umjesto njega primjenjuju se ponekad i druge vrste takvih vodova. Uzdužna komponenta elektromagnetskog polja putuje, međutim, još znatno sporije od elektromagnetskog polja koje se kreće duž heliksa. Brzina elektrona mora se podeliti tako da bude otprilike jednaka brzini uzdužne komponente. Već prema svojoj fazi, polje elektrone mlaza ubrzava ili usporava, stvarajući time zgušnjavanja ili razrjeđenja elektrona. Ovako formiran mlaz djeluje opet na polje, i za vrijeme dok ga ono koči predaje mu svoju energiju. Takva interakcija elektromagnetskog vala i snopa elektrona odvija se duž cijele cijevi. Da bi snop elektrona bio dobro usmjeren, postavlja se oko cijevi elektromagnet koji ga koncentrira duž osi cijevi. Budući da ove elektronke rade bez rezonatora, one mogu poslužiti za pojačanje u području frekvencija širine nekoliko megaherca. One se upotrebljavaju za rad na frekvencijama od 2 do 6 GHz, a primjenjuju se u prijemnim i odašiljačkim stepenima radio-relejnih uređaja (za snage do 20 W) i kao oscilatori s vanjskom pobudom za snage do nekoliko kilovata pri stalnom pogonu i za snage do nekoliko megavata pri impulsnom pogonu.

Pokazivačke elektronke

Pokazivačke cijevi imaju svojstvo da električne veličine (struje i napone) dovedene elektrodama ili zavojnicama cijevi pretvore u vidljiv znak ili sliku. Vidljiv se znak dobiva uslijed udara elektrona u fluorescentni sloj nanesen na staklo s unutarnje strane cijevi.

Magično oko. Najjednostavnija pokazivačka cijev je tzv. magično oko, koje služi u prijemnicima za tačno ugađanje na prijemnu stanicu ili kao indikator nule u nekim mjernim aparatima. Elektronski se snop otklanja elektrostatički pa se, ovisno o naponu privedenom štapastoj rešetki cijevi, dobiva na fluorescentnom ekranu uža ili šire zeleno osvijetljeno područje (sl. 40). Cijev se najčešće izrađuje tako da se u istom balonu nalazi i jedan triodni sistem koji služi za pojačanje privedenog napona.



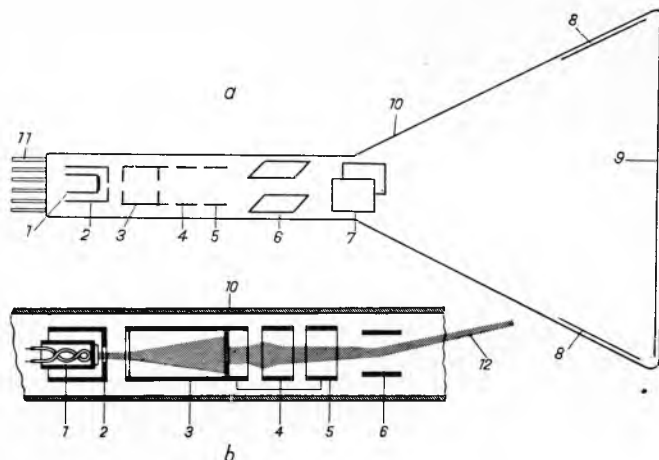
Sl. 40. Magično oko. a Shematski presjek, b svijetleći sektor; 1 katoda, 2 štit, 3 fluorescentni ekran, 4 anoda, 5 štapasta rešetka

Osciloskopska ili katodna cijev (ponekad se naziva i Braunovom cijevi prema izumitelju prve takve cijevi, F. Braunu, 1897) sastoji se od elektronskog topa, otklonskog sistema, fluorescentnog zastora i staklenog balona u koji su svi ovi dijelovi ugrađeni (sl. 41 a).

Elektronski top (sl. 41 b) sastoji se od indirektno žarene katode 1 koju okružuje cilindrična upravljačka rešetka 2 (tzv. Wehneltov cilindar), od elektroda za ubrzavanje elektrona (3 i 5) i elektrode 4 koja služi za fokusiranje snopa. Rešetka je negativna prema katodi i elektrodama za ubrzavanje, na kojima vlada napon 2...3 kV, i prema elektrodi za fokusiranje, na kojoj vlada napon od 0,5...1 kV. Elektrone koji izauđu iz rešetke ubrzava prva elektroda za ubrzavanje 3. Kao što se vidi na slici, polje između elektroda 3 i 4 djeluje na elektrone tako da ih rasipa, a polje između elektrode 4 i 5 tako da ih skuplja (*elektrostatičke leće*). Kako ovdje elektroni imaju veću brzinu, skupljanje prevladava, pa se putanje elektrona sijeku u žarišnoj tački tog elektronskog optičkog sistema, koja treba da leži na ekranu. Kad na otklonskim pločicama nema napona, tanko fokusirani snop udara u centar kružnog fluorescentnog zastora (ekrana) i tamo izaziva sitnu svijetlu tačku. Podešavanjem napona cilindrične rešetke dobiva se željena svjetloća tačke na ekranu u koju udaraju elektroni, a podešavanjem napona elektrode za fokusiranje 4 postiže se fokusiranje snopa u jednu tačku.

Otklonski sistem sastoji se od dva para paralelnih i međusobno okomito postavljenih pločica 6 i 7. Elektronski snop koji prolazi između tih pločica otklanja se u vertikalnom smjeru uslijed

napona na vertikalnim otklonskim pločicama i u horizontalnom smjeru uslijed napona na horizontalnim pločicama. Zbog toga su horizontalna i vertikalna udaljenost svijetle tačke na ekranu od osi cijevi proporcionalne trenutnoj vrijednosti napona na pripadnim otklonskim pločicama.



Sl. 41. Osciloskopska cijev. a Shematski prikaz osciloskopske cijevi s elektrostatičkim fokusiranjem i otklanjanjem, b elektronski top takve cijevi sa snopom elektrona; 1 katoda, 2 rešetka (Wehneltov cilindar), 3 prva ubrzavajuća elektroda, 4 fokusirajuća elektroda, 5 druga ubrzavajuća elektroda, 6 ploče za vertikalni otklon, 7 ploče za horizontalni otklon, 8 anoda za dodatno ubrzanje elektroda, 9 fluorescentni ekran, 10 stakleni balon, 11 priključni elektrode, 12 snop elektrona

Fluorescentni zastor ili ekran načinjen je od fluorescentnih materijala, često zvanih fosfori, koji se sastoje od spojeva cinka, kadmijuma ili berilijuma (Zn_2SiO_4 , ZnS , CdS , BeO). Taj materijal, kojim je premazana unutarnja čeonu strana staklenog balona, pri udaru elektrona emitira zeleno, plavo, bijelo ili žuto svjetlo, ovisno o svom sastavu. Svjetlo je to intenzivnije što je veća kinetička energija elektrona. Ova, pak, ovisi o naponu kojim se ubrzavaju elektroni što udaraju u ekran. Osjetljivost katodne cijevi, tj. omjer između otklona zrake na ekranu i napona na otklonskim pločicama (izražava se u cm/V) to je veća što je napon ubrzanja na elektronskom topu manji. Da bi cijev istovremeno imala i veliku osjetljivost i davala dovoljno intenzivno svjetlo, elektroni se po izlasku iz otklonskog sistema ponekad dodatno ubrzavaju naponom od ~ 10 kV dovedenim anodi za dodatno ubrzanje 8, koja se nalazi između otklonskog sistema i ekrana. Katodna cijev može sadržati također dva elektronska topa i dva otklonska sistema koji istovremeno daju sliku na istom ekranu (*katodne cijevi za dvije zrake*).

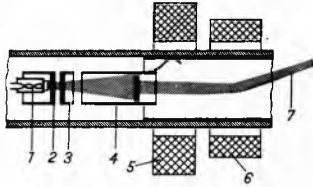
Radarska katodna cijev. Budući da za različite svrhe postoje vrlo različiti radarski pokazivači (npr. za mjerenje udaljenosti, praćenje cilja, panoramsko prikazivanje morske površine ili zračnog prostora, itd. (v. *Elektronika, uređaji*), mogu se i radarske katodne cijevi po konstrukciji među sobom znatno razlikovati. Međutim, načelno sve su one slične osciloskopskim cijevima. Za radarske pokazivače na kojima treba prikazivanje vršiti u Kartezijskom koordinatnom sistemu (npr. pri mjerenju udaljenosti), primjenjuju se različite varijante cijevi koje rade s elektrostatičkim otklanjanjem. Za pokazivače s panoramskim prikazivanjem, npr. gdje se prikazivanje vrši u polarnom koordinatnom sistemu, primjenjuju se pretežno cijevi s magnetskim otklanjanjem (v. malo dalje Kineskop). U tom se slučaju otklanjanje vrši s pomoću zavojnice koja je smještena oko grla cijevi i rotira sinhrono s antenom radara. Veličina otklona ovisi o jakosti struje u zavojnici za otklanjanje. Radi lakšeg praćenja ciljeva primjenjuje se za ekrane nekih radarskih katodnih cijevi (npr. za panoramski pokazivač) fosfori koji svijetle još neko vrijeme nakon prolaska snopa, tj. fosfori s duljom perzistencijom (dosjajem).

Karaktron je radarska cijev sa dva otklonska sistema. Jedan otklonski sistem usmjerava snop kroz otvore u obliku oznaka (kvadrata, kružića itd.), slova i brojki, a drugi otklonski sistem ima istu funkciju kao u ostalim katodnim cijevima. Na taj se način na željenom mjestu ekrana može dobiti ispisana određena oznaka (engl. *character*) radi označivanja pojedinih ciljeva.

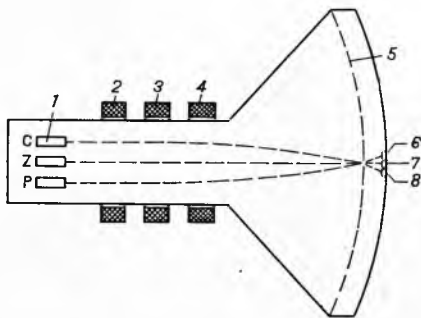
Kineskopi su katodne cijevi za reprodukciju slike u akromatskoj (crno-bijeloj) televiziji. Oni su slični osciloskopskim cijevima, ali s obzirom na veće dimenzije slike mora kut otklona snopa biti znatno veći nego u do sada opisanim cijevima (najveći otkloni sada iznose 70° , 90° i 110°). Stoga se kod njih isključivo primjenjuje magnetsko otklanjanje pomoću dva para svitaka za horizontalno i vertikalno otklanjanje koji su jedan prema drugom pomaknuti za 90° . Ovi su svici smješteni izvana oko grla cijevi (sl. 42). U vratu cijevi nalazi se sistem za stvaranje snopa i za upravljanje svjetloćom slike na ekranu. Kao elektronskooptički sistem primjenjuju se u kineskopima elektrostatičke leće, magnetske leće i kombinacije jednih i drugih. Na sl. 42 dat je primjer elektronskog topa s magnetskim fokusiranjem (zavojnica 5) i magnetskim otklanjanjem (zavojnica 6). Ponekad se os takvih elektronskih topova ne poklapa s osi cijevi, da bi se eliminirali negativni ioni koji s vremenom mogu oštetiti ekran (ionska mrlja u sredini ekrana). U tom se slučaju primjenjuju dodatni magneti (ionski magnet) i zavojnice. Napon na anodi za dodatno ubrzanje iznosi ~ 17 kV, da bi se dobila svijetla slika. Ekran kineskopa mora imati izvjesnu perzistenciju ($\sim 1/50$ s). Radi sprečavanja nepoželjenih refleksija svjetla u unutrašnjosti cijevi u novijim se tipovima kineskopa napari na fluorescentni sloj ekrana s unutrašnje strane tanak sloj ($0,1\cdots 0,5 \mu\text{m}$) aluminijuma koji prema natrag zaslanja, a prema naprijed reflektira svjetlo, pa se time povećava svjetlosna izdašnost. Video-signalom mijenja se potencijal rešetke (Wehneltovog cilindra) i time modulira snop elektrona koji na pojedinim mjestima ekrana, prema sinhronizaciji rastera, izaziva različitu svjetloću, čime se ostvaruje akromatska slika.

Katodne cijevi za reprodukciju televizijske slike u boji imaju ekran izrađen u obliku mozaika od triju vrsta fluorescentnih elemenata, od kojih jedni daju crveno, drugi zeleno, a treći plavo svjetlo. Miješanjem tih triju boja dobiju se i sve ostale boje.

Cijev s maskom (sl. 43) ima tri elektronska topa s elektrostatičkim fokusiranjem i magnetskim otklanjanjem, a ispred ekrana



Sl. 42. Elektronski top s magnetskim fokusiranjem i magnetskim otklanjanjem. 1 Katoda, 2 upravljačka rešetka (Wehneltov cilindar), 3 prva ubrzavajuća elektroda, 4 druga ubrzavajuća elektroda, 5 zavojnica za fokusiranje, 6 zavojnica elektromagneta za otklanjanje

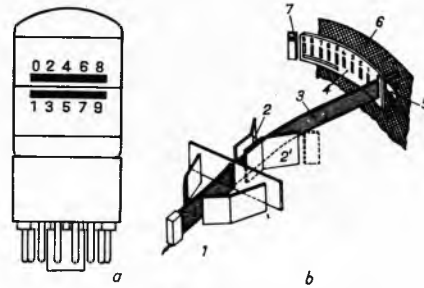


Sl. 43. Cijev s maskom, shematski prikaz. 1 Elektronski topovi za tri različita snopa elektrona, 2 zavojnica konvergencije, 3 magnet za čistoću boje, 4 otklonna zavojnica, 5 maska, 6 element ekrana koji daje plavu boju, 7 element ekrana koji daje zelenu boju, 8 element ekrana koji daje crvenu boju

s unutrašnje strane nalazi se metalna ploča, zvana maska, sa $\sim 400\,000$ rupa promjera oko $300 \mu\text{m}$. Do elemenata ekrana koji daju jednu od triju osnovnih boja dopiru elektroni samo iz jednog od triju topova. To se postiže djelovanjem maske i fokusiranjem snopova pomoću tzv. magneta za čistoću boja. Pomoću tzv. zavojnice konvergencije postiže se da sva tri snopa prolaze uglavnom kroz iste otvore na cijeloj maski. Ipak 80% elektrona udara u masku ne dospjevši do ekrana, što predstavlja gubitke, pa napon dodatnog ubrzanja mora iznositi čak 23 kV da bi se dobila željena svjetloća tačaka na ekranu.

Kromatron sa tri snopa ima umjesto maske vertikalne otklonske vodiče na koje je priključen napon ubrzanja, a fluorescentni elementi za tri različite boje nanoseni su na ekran kao vertikalne pruge. Djelovanje vodiča jednako je kao i djelovanje maske, samo je ovdje iskoristivost snopa veća. Postoji i kromatron samo s jednim elektronskim topom. U tom slučaju se dodatni otklon snopa do elemenata odgovarajuće boje dobiva pomoću vodiča neposredno uz ekran. Za ovakvu je cijev potrebno da tri različita signala, koji će dati tri različite boje, dolaze uzastopno u vremenskom slijedu sinhrono s naponom na otklonskim vodičima (*sekvencijski sistem*). Tako snop pogađa najprije elemente jedne boje, a zatim prelazi na elemente druge i, konačno, treće boje.

Brojačke cijevi su pokazivačke cijevi u kojima elektronski snop pada na mjesto označeno brojkom i osvjetljava ga, a položaj je snopa ovisan o broju naponskih impulsa koji su došli na elektrode cijevi. EIT je oznaka za brojačku cijev firme Valvo u kojoj snop elektrona uskog pravokutnog oblika pada na jedno od deset mogućih mjesta na ekranu obilježenih brojkama 0 do 9. To je zapravo mala katodna cijev u kojoj elektronski snop može imati deset različitih stabilnih položaja. Vanjski izgled takve brojačke cijevi prikazuje sl. 44 a, a razmještaj njenih elektroda sl. 44 b. Snop 3 iz elektronskog topa 1 otklanja se pločicama 2, 2' i prolazi kroz rešetku s prorezima 4 na anodu 5. Dio elektronâ prolazi kroz nju, udara u fluorescentni ekran 6 i osvjetli pripadnu brojku. S pomoću rešetke s prorezima i prikladnog sklopa biva snop nakon svakog impulsa pomaknut za jedan korak naprijed.

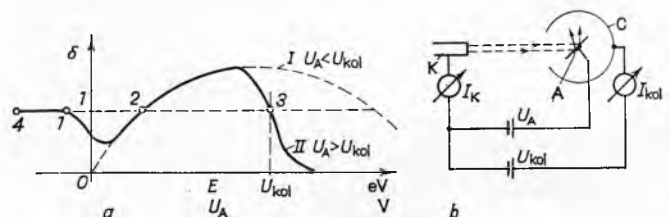


Sl. 44. Brojačka cijev tipa EIT. a Vanjski izgled, b razmještaj elektroda: 1 elektronski top, 2 i 2' otklonske ploče, 3 snop elektrona, 4 rešetka s prorezima, 5 anoda, 6 fluorescentni ekran, 7 pomoćna anoda

Od devetice snop preskače posredstvom pomoćne anode 7 natrag na nulu, a istovremeno se daje i poticajni impuls za rad iduće cijevi. Sa 6 cijevi može se npr. brojiti 1 milion impulsa. Ovakvim pokazivačkim cijevima može se brojiti u sekundi 30 000 do 100 000 impulsa.

Cijevi sa sekundarnom emisijom

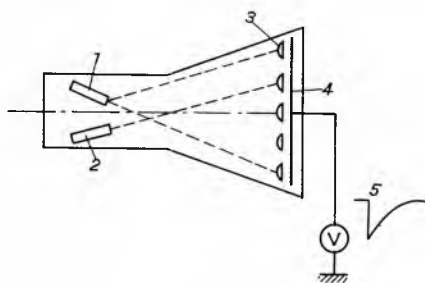
U cijevima kao što su katodne cijevi sa zadržavanjem i analizatorske cijevi (cijevi za televizijske kamere) primjenjuje se pored termionske emisije također sekundarna emisija i fotoemisija (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 675 i 676). Ovisnost faktora sekundarne emisije δ (tj. omjer između broja sekundarnih i broja primarnih elektrona) o energiji primarnih elektrona prikazan je na sl. 45 krivuljom I. Može se mjeriti sklopom prema sl. 45 b, jer je energija elektrona proporcionalna anodnom naponu U_A , a omjer između struje kolektora I_{kol} i katodne struje I_K pred-



Sl. 45. Sekundarna emisija. a Ovisnost faktora sekundarne emisije δ o energiji primarnih elektrona E ili o naponu anode U_A za $U_A < U_{kol}$ i $U_A > U_{kol}$, b shematski prikaz mjerenja faktora sekundarne emisije; K katoda, A anoda koja ima sposobnost sekundarne emisije, C kolektor

stavlja faktor sekundarne emisije $\delta = I_{kol}/I_K$. U ovom slučaju napon kolektora U_{kol} treba da je tek malo veći od napona anode U_A , pa da svi sekundarni elektroni stignu na kolektor, ali da primarni elektroni ne odlaze s anode (krivulja I). Ako se, međutim, napon kolektora znatno smanji u odnosu prema anodnom naponu U_A , kao U_{kol} na sl. 43 a, prividni će faktor sekundarne emisije ovisiti o anodnom naponu prema krivulji II, jer za $U_A > U_{kol}$ vlada između anode i kolektora polje koje privlači i sekundarne elektrone k anodi. Prividni faktor sekundarne emisije jednak je jedinici u tački 1 (i za anodne napone manje od vrijednosti određene tom tačkom), jer za negativne anodne napone svi primarni elektroni dolaze na kolektor. Faktor δ je jednak jedinici i u tačkama 2 i 3 u kojima je broj elektrona koji stižu na anodu jednak broju elektrona koji napuštaju anodu. Ako se anoda odspoji, ona će zauzeti potencijal određen bilo tačkom 1 bilo tačkom 3, dok je tačka 2 nestabilna, jer je lijevo od nje $\delta < 1$, pa manji broj elektrona napušta anodu nego što na nju stiže, i anoda se nabija negativno sve do tačke 1. Suprotno je za tačke desno od tačke 2, gdje se, zbog $\delta > 1$, anoda nabija pozitivno sve do tačke 3. Anoda, prema tome, može zauzeti dva različita potencijala, ovisno o tome da li je u početku dovedena na napon veći ili manji od onog koji je određen nestabilnom tačkom 2.

Katodne cijevi sa zadržavanjem građene su tako da imaju dva elektronska topa od kojih jedan, podržavajući, šalje polagane elektrone istovremeno preko cijelog ekrana (top 1 na sl. 46),



Sl. 46. Princip katodne cijevi sa zadržavanjem. 1 Top za podržavanje, 2 top za upisivanje, 3 anoda s fluorescentnim slojem (ekran), 4 prozirni kolektor, 5 oblik napona za brisanje

a drugi (top 2), koji služi za upisivanje, daje dobro fokusirani mlaz brzih elektrona na određeni dio anode 3, koja sada služi kao ekran, a sastavljena je poput mozaika od velikog broja međusobno izoliranih fluorescentnih elemenata koji imaju sposobnost sekundarne emisije. Kolektor 4 je prozirna vodljiva elektroda, koja se nalazi iza fluorescentnog ekrana. Kada se elektronski top za upisivanje 2 dovede na negativni napon, elektroni njegovog snopa pogadati će određene tačke ekrana s velikom energijom (brzinom); ako je ta energija veća od energije određene tačkom 2 (na sl. 45 a) djelovanje podržavajućeg snopa dovest će i zadržati taj element ekrana na potencijalu stabilne tačke 3 (krivulja II). Dijelovi ekrana do kojih ne dođu elektroni velike energije ostat će na potencijalu tačke 1. Elektroni podržavajućeg snopa koji stižu na dijelove ekrana sa visokim potencijalom imaju i veće energije od elektrona koji stižu na dijelove ekrana nižeg potencijala. Fluorescentni sloj će zato davati znatno jače svjetlo na onim dijelovima ekrana do kojih je dopro snop velike energije iz topa za upisivanje. Na taj način upisana informacija daje svjetlosni podatak na ekranu. Ovakva cijev naziva se *bistabilnom* jer izlazni svjetlosni signal nema polutona, već se ispoljava u obliku svijetlih ili tamnih područja na ekranu. Brisanje informacije s ekrana postiže se dovođenjem kolektoru impulsa u obliku negativnog pilastog napona. Uslijed kapaciteta između kolektora i ekrana, brza promjena napona na kolektoru prenosi se i na ekran i sve tačke ekrana poprimaju potencijal manji od potencijala tačke 2. Spora promjena napona kolektora u pozitivnom smjeru ne prenosi se na ekran i zato sav ekran pod utjecajem podržavajućeg snopa poprimi potencijal stabilne tačke 1.

Da informacija bude upisana, potrebno je da određen broj elektrona velike energije udari na element ekrana, a to znači da je brzina upisivanja, tj. brzina kojom se zraka za upisivanje otklanja (pod utjecajem otklonskog sistema), ograničena. Ta se

brzina može povećati time što se ekranu dovedu pozitivni impulsi u trenutku neposredno nakon djelovanja snopa za upisivanje. Tada će, iako snop za upisivanje nije doveo ekran na potencijal iznad tačke 2, to učiniti pozitivni impuls. Na tom principu mogu se cijevi konstruirati sa podijeljenim ekranom tako da se pozitivni impulsi dovode samo na jednu polovicu ekrana, pa ekran zadržava sliku samo na tom dijelu. Isto tako se može na tom principu preko već upisane informacije (trajne slike) upisivati dodatna slika koja se neće zadržati jer nema djelovanja pozitivnih impulsa.

Za razliku od bistabilnih cijevi, cijevi sa polutonovima mogu dati i zadržati sliku s različitim svjetlosnim intenzitetima. Ekran takve cijevi radi s potencijalima manjim od potencijala prikazanog tačkom 1 na sl. 45 a, a elektronski snop je podešen tako da potencijal tačke 1 daje znatan intenzitet, a potencijal tačke 4 ne daje nikakvo svjetlo. Snop elektrona velike energije podiže potencijal ekrana, ali ako on nije veći od potencijala tačke 1, ostat će na toj vrijednosti i pod utjecajem podržavajućeg snopa davati svjetlo koje je proporcionalno energiji snopa za upisivanje.

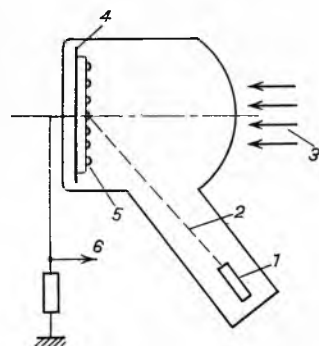
Katodne cijevi sa zadržavanjem imaju danas vrlo široku primjenu. S pomoću njih može se na ekranu prikazan signal zadržati dulje vrijeme (dulje nego na ekranima s najduljom persisten-cijom). To se primjenjuje npr. za prikazivanje jednokratnih pojava, pojava koje se odvijaju vrlo polagano, za uspoređivanje većeg broja pojava (npr. u radarima), i sl.

Analizatorske cijevi za televizijske kamere rade na istom principu kao cijev sa zadržavanjem, samo je efekt obrnut, tj. ulazni podatak je dan u obliku slike na ekranu, a izlazni podatak je napon (video-signal). Područje različitog potencijala na ekranu dobiva se uslijed fotoemisije. Jače osvijetljena područja zbog većeg gubitka elektrona pozitivnija su od slabije osvijetljenih. Pod utjecajem elektronskog (analizatorskog) snopa koji prelazi preko ekrana brzinom ispisivanja televizijske slike, svi elementi ekrana dovode se na potencijal kolektora. Izlazni video-signal se može dobiti bilo preko signalne elektrode kapacitivno vezane s ekranom, bilo koristeći se modulacijom elektronskog snopa.

Ikonoskop (sl. 47), prva i najstarija (1933) analizirajuća cijev danas se više ne upotrebljava.

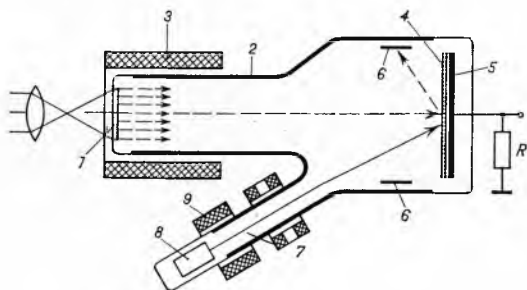
Ona se koristi prvim od navedena dva principa, tj. video-signal dobiva se na signalnoj elektrodi. Analizatorski snop i svjetlo padaju s iste strane na ekran, koji je napravljen od velikog broja sitnih polusfernih međusobno izoliranih elemenata nanesenih na ploču od tinjca (mikanita). Metalizacija nanesena s druge strane ploče je signalna elektroda 4. Kad se u kameri na ekran ikonoscopa projicira živa slika, analizatorski snop prelazi preko nje kontinuirano; kad se na taj ekran projicira film, slika se najprije na ekranu upisuje, a onda, u intervalu između projiciranja dviju slika, ona se očitava analizatorskim snopom. Osvijetljenost prizora koji se prenosi ikonoskopom treba da je ~ 5000 luksa.

Superikonoskop (sl. 48) razvio se iz ikonoscopa dodatkom ekrana za zadržavanje. Optička se slika projicira s pomoću pogodnog optike, koja se nalazi u kameri za snimanje, na fotoosjetljivi ekran 1, tzv. fotokatodu, koja nema sposobnosti zadržavanja. Fotoelektroni što se oslobađaju na pojedinim tačkama fotokateode pod utjecajem svjetlosti slike, ubrzavani naponom od ~ 1000 V ubrzavajuće elektrode 2 i magnetski fokusirani zavojnicama 3, padaju na izolirani ekran za zadržavanje 4 i izbijaju iz njega sekundarne elektrone, koji odlaze na kolektor 6. Time je optička slika sa fotokateode prenesena na ekran za zadržavanje i pretvorena u električnu sliku koja se sastoji od tačica različitog električnog naboja. Ona ostaje tamo dok pod utjecajem analizatorskog snopa što ga stvara elektronski top 8—9 elementi ekrana ne dođu opet na potencijal kolektora. Naponi koji se tom prilikom pojavljuju na otporniku R daju video-signal. Superikonoskop ima znatno



Sl. 47. Ikonoskop, shematski prikaz. 1 Elektronski top, 2 analizatorski snop, 3 zrake svjetla, 4 signalna elektroda, 5 ekran, 6 izlaz videosignala

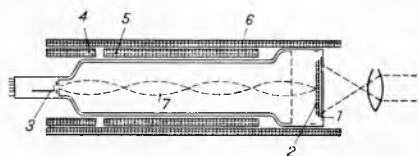
veću osjetljivost nego ikonoskop (potrebna osvjetljenost prizora je ~ 2000 luksa). Zbog vraćanja jednog dijela sekundarnih elektrona na ekran, i to na mjesta preko kojih je snop već prešao i koja su pozitivnija od ostalog dijela, pojavljuju se na slici kao smetnja tamno-svijetla područja koja se protežu dijagonalno slijeva gore nadesno dolje. Taj nedostatak otklanja se kod Riesellovog superikonoskopa pomoćnom fotokatodom kojoj se osvjetljenje može podešavati.



Sl. 48. Shematski prikaz superikonoskopa. 1 Fotokatoda, 2 akceleratorna elektroda, 3 fokusirajuće zavojnice, 4 ekran sa zadržavanjem, 5 signalna elektroda, 6 kolektor, 7 otklonske zavojnice, 8 elektronski top, 9 zavojnice za fokusiranje analizirajućeg snopa

Vidikon (v. поближе u članku *Elektronika, uređaji*) najjednostavnija je analizirajuća cijev. U njoj se kao fotoosjetljiv materijal i materijal za uskladištenje slike primjenjuju sitni poluvodički elementi kojima je prekrivena prozirna vodljiva signalna elektroda koja je preko otpornika R spojena s izvorom napona $10 \dots 100$ V. Na sitne poluvodičke elemente pada analizirajući snop male energije, magnetski fokusiran i otklanjan, i dovodi pojedine tačke tog ekrana na potencijal katode $U_0 = 0$. Optička slika pada na ekran s druge strane. Zbog razlike potencijala nakupljaju se na elementarnim kondenzatorima mali naboji. Pod utjecajem svjetlosti mijenja se, zbog unutarnjeg fotoefekta, otpor dielektrika tih elementarnih kondenzatora, pa svaki element, već prema osvjetljenosti, ima drugi otpor (u mraku otpor im je vrlo velik). U intervalima između dva analiziranja elementarni će se kondenzatori preko vodljivog dielektrika više ili manje izbiti, pa će na unutarnjoj strani ekrana vladati na pojedinim tačkama različiti naponi. Pri analiziranju popunjuju se izgubljeni naboji, a struja koja teče otpornikom R radi popunjavanja elementarnih kondenzatora služi kao video-signal. Vidikon se ranije primjenjivao uglavnom samo za industrijsku televiziju, ali danas se on upotrebljava i za snimanje u studiju.

CPS-emitron (od engl. Cathode Potential Stabilised — sa stabiliziranim potencijalom katode) jest elektronska cijev s uskladištenjem koja radi na principu fotoemisije. Sličan je po konstrukciji vidikonu. Signalna elektroda je prozirna te kroz nju slika pada na ekran koji se sastoji od mozaika sitnih pravilnih kvadratnih elemenata (sl. 49) naparenih na izolator od tinjca ili stakla. Foto-



Sl. 49. CPS-emitron. 1 Signalna elektroda, 2 ekran u obliku mozaika, 3 elektronski top, 4 zavojnice za podešavanje, 5 otklonske zavojnice, 6 zavojnice za fokusiranje, 7 analizirajući snop

emisijom oslobođeni elektroni bivaju privučeni na pozitivnu elektrodu pa stoga pojedini elementi poprimaju pozitivan potencijal ovisan o intenzitetu svjetla. Time se stvara slika pozitivnih naboja koja odgovara snimanoj optičkoj slici. Analizatorski snop male energije, koji uslijed djelovanja magnetskog ili električnog polja dolazi na ekran po helikoidnoj putanji, dovodi elemente po redu analiziranja na potencijal katode, a promjena potencijala se kao video-signal dobiva na signalnoj elektrodi zbog njene kapacitivne veze s ekranom.

Superortikon je analizirajuća elektronska cijev za snimanje u kojoj se izlazni video-signal dobiva modulacijom primarnog analizirajućeg snopa, koji se nakon udaranja u ekran vraća noseći u sebi informaciju o potencijalu one tačke ekrana na koju je udario. Fotokatoda u njoj je odvojena od ekrana za zadržavanje. Detaljan opis i sliku v. u članku *Elektronika, uređaji*. Ova je analizatorska elektronska otprilike deset puta osjetljivija od konvencionalnih i danas se najviše upotrebljava.

Za prenos slike u boji upotrebljavaju se analizatorske elektronke kao i za crno-bijelu sliku, ali se upotrebljavaju po tri, i na njih se istovremeno dovodi slika preko optičkih filtera.

Vakuumske fotocijeve

Vakuumske fotocijeve koriste se svojstvom alkalnih metala (npr. cezijuma) i nekih njihovih spojeva da imaju mali rad izlaza elektrona te obasjani svjetlom emitiraju elektrone. Do fotoemisije dolazi kad je energija fotona svjetla veća od rada izlaza fotokatode, tj. kad je $h\nu > q_0 E_w$, gdje je h Planckova konstanta [$h = (6,6253 \pm 0,0003) \cdot 10^{-34}$ VAs²], ν frekvencija svjetla, q_0 naboj elektrona, a E_w rad izlaza. Spektralna osjetljivost materijala koji se primjenjuju za fotokatupe pokazuje vidan maksimum na određenoj frekvenciji, što znači da povećanje energije fotona daleko iznad one koja je jednaka radu izlaza (smanjenje valne duljine svjetla ispod kritične vrijednosti) ne pridonosi povećanju fotoemisije, već je smanjuje zbog refleksije na površini i zbog smanjenja međusobnog djelovanja fotona i elektrona.

Fotocijeve imaju najčešće cilindričnu geometriju s hladnom polucilindričnom katodom velike površine i anodom u obliku štapića, smještenom koaksijalno s katodom. Pozitivan napon anode privlači sve elektrone koje katoda obasjana svjetlom emitira. Anodna je struja proporcionalna osvjetljenju katode, a neovisna je o anodnom naponu. Osjetljivost je vakuumskih fotocijeve mala: kreće se od 20 do 50 μ A/lm. Veće struje i veće osjetljivosti dobivaju se upotrebom multiplikatora. U tom slučaju elektroni iz katode na svom putu do anode udaraju u nekoliko elektroda (dinoda) koje imaju velik faktor sekundarne emisije, tako da na anodu konačno stigne znatno više elektrona nego što ih je izašlo iz katode. Vakuumske se fotocijeve primjenjuju prvenstveno u mjernim uređajima.

Plinom punjene elektronke

Radi postizanja veće struje ili nekih drugih efekata, neke se elektronke (npr. ispravljačice, neke fotocijeve i sijalice) pune prikladnim neaktivnim plinom (npr. neonom, argonom, parama žive, i sl.). U većini takvih cijevi vlada niski tlak ($10^{-4} \dots 10^{-1}$ mmHg), ali ima i plinskih elektronki pod višim tlakom (v. *Električno osvjjetljenje*, str. 272 i 273). Plinske elektronke mogu imati hladnu (čvrstu ili tekuću) ili užarenu katodu. Iz hladne katode postiže se izlazak elektrona fotoemisijom ili ionskom sekundarnom emisijom, iz užarene katode termionskom emisijom. Ovisno o razlici potencijala koja vlada između katode i anode, elektroni što ih emitira katoda postižu na putu prema anodi manju ili veću brzinu i poprimaju manju ili veću energiju. Oni se pri svom kretanju sudaraju s česticama plina. Prilikom takvih neelastičnih sudara energija elektrona prelazi na čestice plina, pa ako je ta energija dovoljna, dolazi do dviju pojava: do uzbude (ekscitacije) čestice (tj. do prelaska njihovih elektrona u više energetske nivoe), za što je potrebna nešto manja energija, ili do ionizacije čestice (tj. do izbacivanja elektrona iz atoma i stvaranja pozitivnih iona), za što treba nešto više energije (npr. za živinu paru 10,39 eV). U vođenju struje kroz plinske cijevi učestvuju uglavnom primarni i sekundarni elektroni. Udio je pozitivnih iona neznatan jer se oni zbog svoje veće mase kreću prema katodi polaganije. Međutim, pozitivni ioni na svom putu neutraliziraju prostorni naboj i time olakšavaju prolaz elektronima. Zbog toga u plinskim cijevima postoje potpuno drukčiji uvjeti rada nego u vakuumskim elektronkama, a i njihove karakteristike znatno se razlikuju od karakteristika vakuumskih elektronki. Ako do uspostave struje u plinskim cijevima dolazi zbog vanjskih uzbuda (npr. ultravioletnog svjetla, nekog zračenja, itd.), npr. u plinskim fotocijevima ili kod uvoda u tinjavo izbijanje, govori se o nesamostalnom izbijanju. Pri samostalnom se izbijanju tok struje održava zbog unutarnjih pojava u plinu (tako je to pri tinjavom

i lučnom izbijanju). Uzbudeni se atomi vrlo brzo (u intervalu reda veličine 10^{-8} s) vraćaju na neki niži ekscitacioni nivo ili na svoj osnovni, normalni energetske nivo. Pri tome se ranije primljena energija oslobađa u obliku svjetlosti, tj. emisijom fotona određene valne duljine. Stoga se pri radu većine plinskih elektroni pojavljuje svjetlost u području katode (katodno tinjanje) ili uz anodu (pozitivni stup ili plazma). Intenzivnost tog svjetla i širina svijetlećeg područja ovisi o konstrukciji elektronke, o podlatku i o upotrijebljenom plinu. Da prevelika struja ne bi uništila katodu, treba struju kroz plinsku cijev ograničiti otporom vanjskog kruga, npr. predotpornikom, prigušnicom i sl. U plinskim se cijevima primjenjuju različiti oblici izbijanja; rijetko se primjenjuju Townsendovo tamno izbijanje i korona, češće tinjavo izbijanje, a najčešće lučno izbijanje. U plinskim cijevima s užarenom katodom (s termionskom emisijom katode) vođenje struje ima karakter lučnog pražnjenja, mada se elektroni ne emitiraju s male površine, već s cijele aktivne površine katode. Detalji svih tih pojava opisani su u članku *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 672.

Tinjalica je najjednostavnija plinom punjena elektronka s hladnom katodom. Ona se sastoji od dviju elektroda izrađenih u obliku spiralnih žica, okruglih pločica ili sl., smještenih u stakleni balon koji je obično napunjen razrijeđenim neonom pod tlakom od 10 mmHg. Tinjalice se izvode u obliku manjih i većih žarulja (sl. 50 a, b, c, d), a služe kao indikatorske sijalice. Budući da obje elektrode mogu služiti i kao anoda i kao katoda, one se mogu upotrijebiti kao indikatori i istosmjernog i izmjeničkog napona. Napon ionizacije iznosi ~ 100 V, a svjetlo koje se pri radu pojavljuje potječe od katodnog tinjanja. Radi ograničenja struje, u tinjalicama je obično ugrađen predotpornik.

Sl. 50. Tinjalice. a Košarasta tinjalica, b signalna tinjalica, c tinjalica za ugradnju lemljenjem, d sofitna tinjalica

tinjalicama je obično ugrađen predotpornik.

Tinjalica kao stabilizator napona. Tinjalica radi u području tzv. normalnog tinjavog pražnjenja, u kome je pad napona duž tinjalice praktički konstantan i neovisan o jakosti struje, a konstantna ostaje i gustoća struje na katodi. Zbog tog se svojstva mogu tinjalice primijeniti također kao stabilizatori i izvori referentnog napona. Za tu se svrhu izrađuju tinjalice s velikom katodom polucilindričnog ili cilindričnog oblika, postavljenom koaksijalno s anodom štapičastog oblika. Struja se smije pojačavati sve dok skoro cijela katoda nije pokrivena svjetlom. Paljenje se može olakšati štapičastom elektrodom učvršćenom na katodi.

Troelektrodna elektronka s hladnom katodom. Dodavanjem treće elektrode kao pomoćne anode bliže katodi nego što je glavna anoda, smanjuje se napon paljenja tinjalice jer najprije dolazi do ionizacije plina u području između katode i pomoćne anode, a zatim se tok struje prenosi i na glavnu anodu. Tako nastaju elektronke koje mogu služiti i kao releji, jer dovodenjem pozitivnog napona na pomoćnu anodu kroz koju teče mala struja uspostavlja se znatno veća struja kroz glavnu anodu. Prekid strujnog kruga može se postići samo smanjenjem napona na glavnoj anodi.

Dodatno upravljanje početka protoka struje može se postići umetanjem rešetke koja se nalazi između glavne anode, s jedne, i pomoćnih elektroda (anoda i katode), s druge strane. U takvoj elektroni (*arkotronu*) uspostavlja se tinjavo izbijanje, ali se ono prenosi na glavnu anodu tek kad su naponi rešetke i glavne anode dovoljni da izazovu ionizaciju i u predjelu oko glavne anode. Arkotron može davati jake struje i podnijeti visoke napone.

Na sličnom principu radi i *tiratron s hladnom katodom*, koji ima pomoćnu katodu iz koje se prema glavnoj katodi uspostavlja tinjavo izbijanje. a izbijanjem između katode i anode se upravlja pomoću rešetke.

Stroboskopske cijevi građene su tako da mogu dati jake bljeskove s određenim ponavljanjem. To su ksenonom, argonom, kriptonom ili nekom njihovom mješavinom punjene visokotlačne plinske cijevi s hladnom katodom, u kojima se kratkim impulsima struje postižu veliki svjetlosni tokovi ($2 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ lm s).

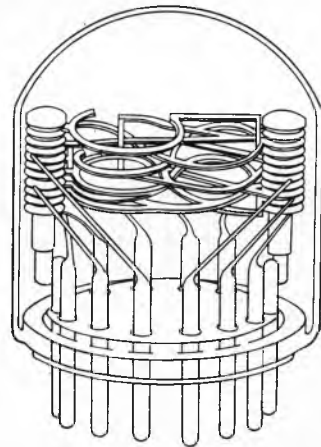
Struja se dobiva iz kondenzatora nabijenog na visoki napon (~ 1000 V), koji se puni iz baterije ili mreže posredstvom prikladnog uređaja. Vrijeme gorenja t takve cijevi ovisi o vremenskoj konstanti uređaja, $t \approx RC$, i iznosi $10 \mu s \dots 100$ ms. U takvim se elektronkama stvara velik pozitivni stup koji pri protoku jakog strujnog impulsa intenzivno svijetli. Cijev ima tri elektrode, dvije glavne i jednu pomoćnu. Napon između glavnih elektroda je visok, ali ne tolik da bi došlo do samostalnog izboja. Do njega dolazi tek dovodenjem pozitivnog impulsa na pomoćnu elektrodu, pri čemu potekne znatna struja. Elektronke ovog tipa upotrebljavaju se za stroboskope i za dobivanje umjetnog svjetla pri fotografiranju (žarulje bliskalice, »blice«, »fleše«).

Plinom punjene fotocijevi rade također s hladnom katodom, ali u području nesamostalnog izbijanja, a struja se uspostavlja uslijed fotoemisije iz katode. Ove fotocijevi građene su na isti način kao i vakuumske, samo su punjene nekim plemenitim plinom pod tlakom od $\sim 0,1$ mmHg. One su osjetljivije od vakuumskih, tj. daju veću struju, jer se broj elektrona na putu od katode na anodu ionizacijom plina povećava. To se događa pri naponima većim od ionizacionog i zato karakteristike pokazuju porast struje s porastom anodnog napona. Povećanje napona ograničeno je područjem samostalnog izboja u kojem cijev ne smije raditi jer gubi svoju fotoosjetljivost. Osjetljivost je višestruko ($5 \dots 10$ puta) veća od osjetljivosti vakuumskih fotocijevi. U usporedbi s vakuumskim cijevima nedostatak im je znatna tromost zbog konačnog vremena deionizacije plina. Ove se cijevi primjenjuju u kinotehnici za reprodukciju zvuka i kao svjetlosni releji u regulacijskoj tehnici.

Ionizaciona komora i Geiger-Müllerova cijev su zatvorene posude propusne za određena zračenja i punjene plinovitim mješavinom relativno niskog tlaka. One imaju dvije elektrode, anodu i katodu, a rade u području nesamostalnog izbijanja. Do izbijanja dolazi uslijed sudara nabijenih čestica sa česticama plina. U ovisnosti o intenzitetu ionizirajućih zraka dobiva se kod ionizirajuće komore veća ili manja srednja vrijednost struje, a kod Geiger-Müllerove cijevi veći ili manji broj strujnih impulsa, tako da ove cijevi nalaze primjenu u kontroli i mjerenju radioaktivnog zračenja. Za detaljan opis v. *Detekcija nuklearnog zračenja*, TE 3, str. 241.

Pokazivačke plinom punjene elektronke upotrebljavaju se

za indicaciju katodnim tinjanjem. Elektronka može imati više katoda, od kojih je svaka izrađena u obliku znaka ili brojke koja se želi vidljivo prikazati. Tinjavo svjetlo formira se samo oko one katode na koju je priključen napon. Takve elektronke za indicaciju brojeva (tzv. Nixie-cijevi) imaju deset katoda načinjenih od tanke žice u obliku brojki od 0 do 9 i jednu anodu. Katode su postavljene jedna iznad druge u smjeru gledanja (sl. 51); s obzirom na to da su žice tanke, katodu oko koje je stvoreno katodno tinjanje ne zasjenjuju ostale, pa se vidi uvijek samo ona katoda koja je trenutno priključena na napon (v. *Elek-*



Sl. 51. Cijev za indicaciju brojke



Sl. 52. Pokazivačka elektronka sa 14 odvojenih pokazivačkih sistema; upotrebljava se u instrumentima s digitalnim očitavanjem

trična mjerenja, TE 3, str. 608). Pokazivačku cijev s više odvojenih sistema prikazuje sl. 52.

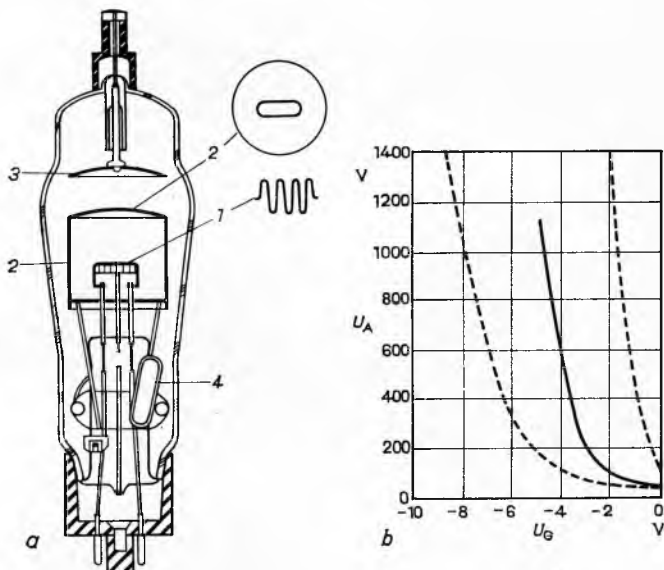
Dekatron je trgovački naziv za plinom punjenu elektronku s hladnom katodom firme Baird-Atomic, koja u svom sistemu sadrži brojački i pokazivački uređaj. Detaljniji opis i shema dekatrona dati su u članku *Električna mjerenja*, TE 3, str. 609.

Na principu dekatrona izvodi se nekoliko različitih varijanta brojčanih elektronki, u kojima katode ne moraju biti spojene.

Elektronke sa žarenom i tekućom katodom rade u području pražnjenja lukom; kroz njih mogu teći znatno veće struje pri niskim naponima nego kroz elektronke s hladnom katodom. Oksidnu katodu obično direktno žari spiralna volframska nit preko koje je nanosena niklena žica; ova je ujedno i nosač oksidnog materijala; anoda je grafitna. Elektronke se izrađuju kao diode, triode ili tetrode (tiratroni) ili kao elektronke s pomoćnom elektrodom za uspostavljanje luka (ignitroni).

Plinom punjene diode mogu biti punjene inernim plinom tlaka 0,1 do 0,5 mmHg ili živinim parama. U potonjem se slučaju u cijevi nalazi kap žive, koja se pod utjecajem povišene temperature isparava. Katoda treba da daje velike struje i zato ima veliku površinu, koja je sva aktivna za emisiju elektrona, jer ne postoji područje prostornog naboja. Ovakve elektronke služe u ispravljačima za jake struje. Posebne konstrukcije visokonaponskih dioda imaju anodu redovno izvedenu na suprotnom kraju staklenog balona, čime se postiže mogućnost priključka napona od nekoliko kilovolt. Anodni se napon smije priključiti tek pošto katoda dosegne dovoljno visoku temperaturu, a zagrijavanje katode do radne temperature može trajati i do nekoliko minuta.

Plinom punjene triode (tiratroni) imaju pored anode i katode rešetku izvedenu u obliku cilindra koji okružuje katodu (sl. 53 a).



Sl. 53. Tiratron. a) Presjek, b) startne karakteristike; 1 žarna nit, 2 rešetka, 3 anoda, 4 posudica sa živom

Rešetka ima upravljačko djelovanje u tom smislu što se naponom rešetke određuje anodni napon pri kojem će se uspostaviti struja kroz cijev. Ovisnost anodnog napona U_A potrebnog za paljenje tiratrona o naponu rešetke U_G zove se *karakteristika paljenja*. Tipična karakteristika paljenja elektronke sa živinim parama prikazana je na sl. 53 b. Za napone lijevo od izvučene krivulje, karakteristike paljenja, elektronka ne vodi. Crtkano su prikazana krajnja moguća odstupanja pojedinih primjeraka istog tipa elektronke. Pošto tiratron proradi, rešetka gubi upravljačko djelovanje, tj. uspostavljena struja ne može se prekinuti negativnim naponom rešetke, već samo smanjenjem anodnog napona ispod vrijednosti napona gašenja luka. Razlog je tome što se rešetka nalazi u području pozitivnog stupa (plazme) i na negativnu rešetku dolaze pozitivni ioni iz plazme, čineći oko nje sloj pozitivnog naboja. Time rešetka biva izolirana od plazme te ne utječe na jakost struje. Promjena napona rešetke djeluje samo na debljinu

sloja. Tiratroni se izvode i kao tetrode, tj. sa dvije rešetke. Druga zakrilna rešetka okružuje ostale tri elektrode i zakriliuje jednu od druge. Time se smanjuje zagrijavanje prve (upravljačke) rešetke i taloženje katodnog materijala na nju, te se smanjuje struja ove rešetke, a ujedno i njezin kapacitet prema anodi.

Tiratroni punjeni plemenitim plinom, živinim parama ili mješavinom jednog i drugog služe kao upravljive sklopke za jake struje i visoke napone. Oni su međutim spori, zbog razmjerno dugih vremena deionizacije (reda veličine 1 ms) i ionizacije ($\sim 10 \mu s$). Tiratroni punjeni vodikom imaju znatno kraće vrijeme deionizacije ($2 \dots 10 \mu s$) i upotrebljavaju se za impulsno napajanje magnetrona i klstrona. Preko njih se, naime, prazne vodovi za kašnjenje. Struja može pri tom biti i preko 1000 A. Podržavanje konstantnog tlaka vodika postiže se time što su u cijevi prisutni određeni materijali koji pri zagrijavanju daju vodik.

Ignitroni su elektronke s tekućom katodom od žive. Pomoću pomoćne elektrode ili *ignitora*, na koji se dovodi impuls relativno visokog napona, uspostavi se pomoćni luk između katode i ignitora. Uslijed ionizacije uspostavlja se tada i luk prema anodi. Elektroni ne izlaze iz cijele površine katode, već samo iz ograničenog područja koje se pomiče po površini žive i koje ima povišenu temperaturu. Anoda je grafitna, a ignitor je od silicijum-karbida, koji podnosi visoke temperature. Velike struje koje mogu teći kroz ignitron bez posebnog zagrijavanja katode omogućuju izradu ispravljača vrlo velikih snaga (do 3000 kW). Ignitroni malih snaga smješteni su u staklene posude; za velike snage upotrebljavaju se čelične posude. Ignitroni s više anoda omogućuju izradu višefaznih punovalnih ispravljača pomoću samo jedne elektronke. Ispravljački i ventilni elektronički uređaji većih snaga obrađeni su u članku *Ispravljači*.

Plinski laseri (lejseri) u biti su također plinom punjene elektronke.

Princip lasera (početna slova engl. riječi *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, tj. pojačanje svjetla uslijed stimulirane emisije radijacije) zasniva se na pojačanju elektromagnetskog vala pri prolasku kroz ionizirani plin. Ako se ionizacijom plina pobude atomi na dva različita energetska nivoa, npr. na nivou 2 i nivou 1, tako da je razlika energetskih nivoa jednaka $E = h \nu$ (h Planckova konstanta, ν frekvencija) i da ima više atoma na višem energetskom nivou 2, elektromagnetski će val frekvencije ν stimulirati prijelaz iz višeg energetskog nivoa na niži, tj. primat će energiju od atoma plina. Elektromagnetski val određene frekvencije (u tom slučaju svjetlo) tako se pojačava. Na taj se način dobiva snop koherentnog svjetla (svjetla s vrlo malim odstupanjima frekvencije od srednje vrijednosti: svega nekoliko herca) i s relativno velikom energijom (nekoliko MW/cm²). Optičkim sistemom obrazovanom od dva ogledala razmaknuta za cjelobrojni višekratnik valne duljine dobiva se stoji val takvog svjetla, koji se prolazeći kroz ionizirani plin pojačava dok god se ne uspostavi ravnoteža između energije koju elektromagnetski val prima i energije koja se refleksijom i apsorpcijom gubi u optičkom sistemu. (Opširnije o tome v. članak *Laser*.)



Sl. 54. Plinski laser. 1 Katoda, 2 anoda, 3 ogledalo, 4 izlazni snop svjetla

Tipičan plinski laser prikazan shematski na sl. 54 upotrebljava mješavinu neona i helijuma pod tlakom 1,8 mmHg. Anoda je od nikla, a katode od niklene mrežice prevučene oksidnim slojem. Napon između elektroda je 1300 V i daje struju od ~ 10 mA. Cijev ima s obje strane pomoćne prozore postavljene tako da je apsorpcija svjetla određene valne dužine i ravnine polarizacije minimalna. Kvarcna ogledala koja se nalaze izvan cijevi na razmaku određenim valnom duljinom reflektiraju 99% svjetla, a 1% koji prolazi kroz ogledala predstavlja izlazni snop.

POLUVODIČKI SASTAVNI DIJELOVI

Ispravljačko svojstvo na spoju između dva različita materijala (bakar i njegov oksid, selen) poznato je dosta dugo, ali značajniji razvoj tehnologije poluvodiča uslijedio je tek nakon pronalaska tranzistora (kristalne triode) koji je mogao vršiti pojačanje. Još 1930 je Lilienfeld patentirao pojačalo s pomoću tankog sloja sulfida bakra, ali tek 1948 J. Bardeen i W. Brattain, nakon dugog istraživanja, uspijevaju dobiti prvi tačkasti tranzistor. Teoriju slojnih tranzistora daje 1949 W. Shockley (Bardeen, Brattain i Shockley za svoj rad dobivaju 1956 Nobelovu nagradu). 1955 već se proizvode vučeni i legirani slojni tranzistori. 1959 počela se pri izradi poluvodičkih elemenata primjenjivati difuzija i planarna tehnika, a ponekad i epitaksija. Primjenom tih metoda postiglo se da sastavni dijelovi imaju manji volumen, da mogu raditi na višim frekvencijama, da su im snaga i pouzdanost veće, i dr. Stoga proizvodnja i komercijalna primjena poluvodičkih sastavnih dijelova vrlo naglo raste, tako da ti dijelovi danas već u znatnoj mjeri potiskuju elektronke, osim specijalnih i onih za velike snage. Za povezivanje sastavnih dijelova među sobom počeli su se umjesto spojnih žica počevši od 1960

primjenjivati štampani krugovi. U nekim se djelatnostima prešlo već vrlo rano od štampanih krugova na integrirane sklopove koji se u toku posljednjih godina sve više usavršavaju (monolitni sklopovi, sklopovi tankog i debelog filma i različni hibridni sklopovi) i koji se danas već općenito primjenjuju.

Vodljivost poluvodiča. Poluvodiči su čvrste kristalne tvari kojima je električna vodljivost manja od električne vodljivosti metala, a veća od električne vodljivosti izolatora. (Specifična vodljivost im iznosi od 10^{-6} do 10^5 S/m, metalima od 10^6 do 10^8 , a izolatorima od 10^{-10} do 10^{-16} S/m.) Opširnije o njima v. članak *Poluvodiči*; u nastavku slijedi sažet prikaz njihovih svojstava važnih za primjenu u elektronici.

Svaka se tvar sastoji od atoma, a svi atomi, opet, sadrže kao sastojke elektrone. Električna struja u metalima i poluvodičima predstavlja usmjereno gibanje njihovih elektrona; električna vodljivost tih tvari uvjetovana je stoga sposobnošću njihovih elektrona da se, primajući potrebnu energiju od električnog polja, stave u gibanje u njegovom pravcu. Prema kvantnoj teoriji atoma, elektroni u jednom izoliranom atomu mogu posjedovati samo određene diskretne količine energije, ili, kako se kaže, zauzimati samo konačni broj među sobom jasno odvojenih energetskih nivoa (razina). U energetskim stanjima izvan tih nivoa elektroni se ne mogu nalaziti. U kristalnim tvarima, kako su to metali i poluvodiči, atomi nisu jedni od drugih izolirani, već se nalaze blizu jedni drugima u čvorovima kristalne rešetke. Stoga elektroni jednog atoma djeluju na elektrone susjednih atoma tako da nastaje mnoštvo među sobom bliskih energetskih nivoa na kojima se elektron može nalaziti; kažemo da se oštri i među sobom jasno razdvojeni energetski nivoi izoliranog atoma raširuju u kvazikontinuirane energetske pojase (zone), obrazovane od gusto nanizanih energetskih nivoa. Uslijed takvog međudjelovanja, elektroni na najvišim nivoima mogu izgubiti vezu sa svojim atomom i postati slobodno pokretljivi unutar kristalne rešetke.

Pojasi mogućih energetskih stanja elektrona mogu biti jedni od drugih razdvojeni područjima energetskih stanja u kojima se elektron ne može nalaziti (kao energetski nivoi izoliranog atoma od kojih ti pojasi potječu), ili mogu biti toliko rašireni da se jedan s drugim preklapaju. Područje između dva pojasa mogućih (»dovoljenih«) energetskih stanja naziva se *zabranjenim pojasom* ili *energetskim procjepom*.

Na apsolutnoj nuli temperature elektroni kristala zauzimaju najniže moguće energetske nivoe, s time da, prema Paulijevu principu, najviše dva elektrona mogu biti na istom energetskom nivou (tj. raspodjela elektrona po energetskim nivoima pokorava se Fermi-Diracovoj statistici). Izolatori i poluvodiči su tvari čiji elektroni na apsolutnoj nuli upravo potpuno ispunjavaju izvjestan broj nižih dozvoljenih pojasa, ostavljajući sve više dozvoljene pojase praznima. Najviši zauzeti dozvoljeni pojas naziva se *valencijskim* (»valentnim«) *pojasom*, prvi dozvoljeni pojas iznad njega je pojas vodljivosti (uobičajilo se reći *vodljivi pojas*). Između njih je kod izolatora i poluvodiča zabranjen pojas. Elektroni izolatora i poluvodiča na apsolutnoj nuli ne mogu od električnog polja primiti energiju, jer u valencijskom pojasu nema nezauzetog energetskog nivoa na koji bi ih primljena energija mogla dići, a električno polje po pravilu nije dovoljno jako da bi ih njegova energija mogla prebaciti preko zabranjenog pojasa u vodljivi pojas. U metalima najviši zauzeti dozvoljeni pojas nije potpuno zaposjednut elektronima, bilo zbog toga što nema za to dovoljno elektrona, bilo zbog toga što se posljednji potpuno zauzeti pojas preklapa sa slijedećim višim (nema zabranjenog pojasa među njima). U metalima stoga i na apsolutnoj nuli temperature ima energetskih nivoa u koje energija primljena od električnog polja može podignuti elektrone, pa je metal i na apsolutnoj nuli električki vodljiv. Od materijala koji na apsolutnoj nuli nisu električki vodljivi, u jednih je energetski procjep iznad valencijskog pojasa toliko uzak da na višim temperaturama termička energija može pojedine elektrone prebaciti iz tog pojasa u vodljivi pojas, gdje se nalazi dovoljno nezaposjednutih dozvoljenih energetskih nivoa; ti su materijali poluvodiči. Izolatori su materijali u kojih je energetski procjep toliko širok da ga elektroni djelovanjem termičke energije ne mogu preskočiti (ili ga može preskočiti tek vrlo mali broj elektrona). Rečeno drugim riječima: u vodičima ima mnogo nevezanih elektrona koji se mogu slobodno kretati u kristalnoj rešetci, u poluvodičima mogu se pojedini elektroni toplinskim gibanjem istrgnuti iz sklopa atoma i postati slobodno pokretljivi

(*ionizacija*), u izolatorima elektroni su tako čvrsto vezani u atomu da je njegova ionizacija (gotovo) nemoguća.

Elektroni oslobođeni iz atoma ubrzavaju se električnim poljem, ali im brzina ne raste bezgranično, kao da su u vakuumu, nego se oni usporavaju sudarima s drugim elektronima i na kraju, nakon određenog vremenskog intervala od njihova izlaska, zvanog njihovim *trajanjem života*, zahvaća ih i veže neki ionizirani atom (*rekombinacija*). Koncentracija slobodnih iona u rešeci poluvodiča rezultat je (na određenoj temperaturi) ravnoteže između ionizacije i rekombinacije, a prividna srednja brzina kretanja elektrona kroz rešetku na određenoj je temperaturi konstantna i linearno ovisna o jakosti polja. Faktor proporcionalnosti između srednje brzine kretanja elektrona i jakosti polja zove se *pokretljivost elektrona*. Broj slobodnih elektrona eksponencijalno raste s temperaturom.

Čisti i primjesni poluvodiči. Neke su tvari poluvodiči i u savršeno čistom stanju. Takvi »čisti poluvodiči« jesu poluvodiči »po svojoj unutrašnjoj prirodi«, pa se zato nazivaju i »intrinseknima« (lat. *intrinsecus unutrašnji*). To su po pravilu kristalizirani četverovalentni elementi (silicijum, germanijum, sivi kositar), tj. elementi koji imaju četiri elektrona u najvišim energetskim nivoima svojih atoma (valencijska elektrona). U kristalu tih elemenata valencijski su elektroni potpuno angažirani u ostvarivanju kovalentne veze među atomima i stoga su dosta čvrsto vezani; energetski procjep treba da je razmjerno uzak da bi se takvi elektroni mogli termičkom energijom prebaciti preko njega. Kad iz potpuno zaposjednutog valencijskog pojasa takvog čistog poluvodiča elektroni pređu preko zabranjenog pojasa u vodljivi pojas, oni uzrokuju vodljivost poluvodiča — kako je već gore rečeno — te se u električnom polju uspostavlja struja uslijed kretanja slobodnih elektrona, dakle negativnih nabojâ, u smjeru suprotnom smjeru polja. Ali osim toga, odlaskom elektrona iz valencijskog pojasa ovaj prestaje biti potpuno zaposjednut, pojavljuju se nezauzeti energetski nivoi, tzv. *šupljine*, u koje mogu pod djelovanjem energije električnog polja uskakovati elektroni sa nižih nivoa valentnog pojasa. Tamo gdje su bili ti elektroni zaostaje šupljina, u koju opet može uskočiti elektron s još nižeg nivoa, itd. Na taj način elektroni (negativni naboji) i unutar valentnog pojasa putuju iz šupljine u šupljinu suprotno smjeru polja, a šupljine putuju u protivnom smjeru, dakle u smjeru u kojem bi putovao pozitivni naboj. Šupljine se dakle ponašaju kao pozitivni naboj, pa se formalno pravilno kaže da se u poluvodiču struja vodi elektronima i šupljinama. Specijalno se u čistim poluvodičima struja vodi u istoj mjeri jednim i drugima od tih nosilaca nabojâ, jer se svakim preskokom elektrona preko zabranjenog pojasa stvara jedan par »slobodan elektron-šupljina«, pa u čistom poluvodiču ima jednak broj slobodnih elektrona i šupljina. Kaže se da je vodljivost čistog poluvodiča (vlastita, unutarnja ili intrinsekna vodljivost) u jednakoj mjeri *N-vodljivost* (vodljivost negativnim nabojima, elektronima) i *P-vodljivost* (vodljivost »pozitivnim nabojima«, šupljinama).

Sasvim analogno opisuje se ionska vodljivost u elektrolitima, samo se tamo govori o »pozitivnom naboju« umjesto o »šupljini«. Anioni zaista prenose naboj, tj. elektron, kroz elektrolit; kationi, naprotiv, prenose, u stvari, šupljine koje su u njima nastale time što su elektroni iz valencijske ljuske atoma prešli na anodu. U te šupljine, kad s ionom doputuju na katodu, s ove uskaču elektroni, pa su, u rezultatu, oni »preneseni« s katode na anodu.

Ako se u čistom poluvodiču poveća koncentracija bilo slobodnih elektrona bilo šupljina, dobiju se poluvodiči koji su vodljiviji od čistih i u kojima prevladava N-vodljivost, odn. P-vodljivost. To se postiže tako da se čistom kristalu četverovalentnog elementa dodaje neznatna količina (u omjeru $1 : 10^5$ do $1 : 10^7$) nekih drugih elemenata, zvanih *primjese* ili nečistoće. (To se dodavanje primjesa naziva i *dopiranje* čistog poluvodiča.) Dodaju li se, npr., čistom kristaliziranom germanijumu male količine nekog peterovalentnog elementa (antimona, bizmuta, arsena ili fosfora) četiri od njegovih pet valencijskih elektrona angažiraju se za četiri valencijska elektrona germanijuma u kovalentnoj vezi između atoma germanijuma i primjesnog elementa, te su oni stoga čvrsto vezani (na niskim energetskim nivoima) poput valencijskih elektrona samog germanijuma: peti valencijski elektron primjesnog elementa ostaje slobodan, tj. on unosi u zabranjeni pojas germanijuma jedan »lokalni« visoki energetski nivo, s kojega elektron može lako preskočiti u vodljivi pojas i uzrokovati vodljivost.

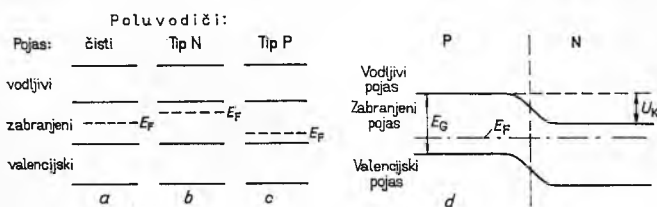
Takav elektron ne zaostavlja za sobom šupljine u valencijskom pojasu, pa vodljivost takvog primjesnog poluvodiča predstavlja N-vodljivost. Dodaju li se čistom germanijumu male količine nekog trovalentnog elementa (galijuma, indijuma ili aluminijuma), njegova se tri valencijska elektrona angažiraju u zajednici sa tri valencijska elektrona germanijuma u ostvarenju kovalentne veze, a kao par nivou četvrtog valencijskog elektrona germanijuma pojavljuje se u zabranjenoj zoni germanijuma nezaposjednuti dozvoljeni »lokalni« energetska nivo, na koji lako može iz valencijskog pojasa skočiti elektron, ostavljajući za sobom šupljinu koja uzrokuje vodljivost. Kako u vodljivom pojasu takvog primjesnog poluvodiča nema elektrona koji bi bio par šupljini u valencijskom pojasu, primjesna vodljivost tog je poluvodiča P-vodljivost. (V. članak *Čvrsto stanje*, TE 3, str. 135, sl. 4). Trovalentni primjesni element zove se *akceptor* (primalec) jer njegov atom prima elektron od susjednog četverovalentnog atoma pretvarajući se u negativni ion; peterovalentni primjesni element zove se *donor* (davalac) jer njegov atom daje elektron u kristalnu rešetku pretvarajući se u pozitivni ion. Poluvodiči s primjesnom vodljivošću imaju redovito i vlastitu (unutrašnju, intrinseku) vodljivost. Tip nosioca naboja (elektron ili šupljina) koji je u poluvodiču u većoj koncentraciji zove se *većinski nosilac*, a onaj kojemu je koncentracija manja, *manjinski nosilac*. Poluvodič kojemu je većinski nosilac elektron zove se poluvodič tipa N; poluvodič u kojemu se struja vodi pretežno šupljinama zove se poluvodič tipa P. Slično djelovanje kao dopiranje čistog poluvodiča mogu imati i fizički defekti njegove kristalne rešetke.

Osim kristala četverovalentnih elemenata, vlastita poluvodička svojstva mogu imati i neki spojevi, npr. Cu_2O , HgIn_2Te_4 , MgSb_2 , MgJ_2 i binarni spojevi tipa AB u kojima su A i B elementi iz dvije grupe periodnog sistema koje su simetrično smještene prema grupi IV: AgJ (I-VII), MgTe, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdSe, CdTe, HgSe (II-VI), InSb (III-V).

Raspodjela elektrona po energetskim nivoima i koncentracija nosilaca naboja u poluvodičima. Raspodjela elektrona po energetskim nivoima određena je (kako je već rečeno) Fermi-Diracovom statistikom. Po njoj vjerojatnost da će energetska nivo E biti zaposjednut elektronom prikazuje funkcija distribucije izražena jednadžbom

$$f = \left(1 + \exp \frac{E - E_F}{kT} \right)^{-1}$$

U njoj je k Boltzmannova konstanta, T apsolutna temperatura, a E_F je tzv. *Fermijev energetska nivo*, tj. energetska nivo za koji je vjerojatnost da će ga zaposjesti elektron jednaka 1/2. Fermijev nivo određen je raspodjelom energetskih nivoa i ukupnim brojem elektrona, dakle prirodom kristalnog tijela; na apsolutnoj nuli temperature svi su energetska nivoi ispod Fermijevog potpuno zaposjednuti, a svi nivoi iznad Fermijevog prazni. U skladu s naprijed izloženim, Fermijev nivo kod metala nalazi se u valentnom pojasu, a kod poluvodiča u zabranjenom pojasu, i to kod čistih poluvodiča u sredini tog pojasa, kod poluvodiča tipa P bliže valencijskom pojasu, a kod poluvodiča tipa N bliže vodljivom pojasu (sl. 55 a, b, c).



Sl. 55. Fermijev energetska nivo: a u čistom poluvodiču, b u poluvodiču tipa N, c u poluvodiču tipa P, d u PN-spoju

Koncentracija nosilaca naboja u čistom poluvodiču (vlastita, unutarnja ili intrinsekna koncentracija n_i elektrona jednaka vlastitoj koncentraciji šupljina p_i) u ovisnosti o temperaturi izražena je jednadžbom

$$n_i = p_i = A T^{3/2} \exp \left(-\frac{E_G}{2kT} \right),$$

gdje je A konstanta koja sadrži Planckovu konstantu h , Boltzmannovu konstantu k i efektivne mase nosilaca naboja, a E_G je širina energetskog procjepa. U poluvodičima tipa N, odn. P,

koncentracija nosilaca naboja može se u ovisnosti o vlastitoj koncentraciji, temperaturi i promjeni Fermijeve nivoa izraziti jednadžbama

$$n = n_i \exp \frac{E_F - E_i}{kT}, \quad p = p_i \exp \frac{E_i - E_F}{kT}$$

u kojima E_F znači Fermijev nivo u poluvodiču dotičnog tipa, a E_i Fermijev nivo čistog poluvodiča. Ako se te jednadžbe pomnože jedna s drugom, dobije se da je

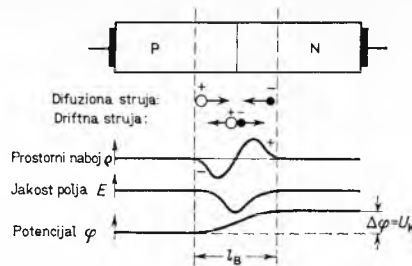
$$np = n_i p_i = n_i^2 = p_i^2, \quad (20)$$

tj. umnožak koncentracija slobodnih elektrona i šupljina je konstantan i jednak kvadratu vlastite koncentracije. To znači da ako se dopiranjem poveća koncentracija jednog tipa nosilaca, koncentracija se drugom u istom omjeru smanjuje.

PN-spoj. Spoje li se nekim tehnološkim postupkom, npr. legiranjem ili difuzijom, P-vodljivi i N-vodljivi poluvodič prismo jedan s drugim, na prelazu se između njih stvara tzv. PN-spoj. Takav spoj ispoljava određena svojstva, kao npr. ispravljačko djelovanje, zbog kojih se u elektronici uvelike upotrebljava.

Dva poluvodiča različitog tipa s PN-spojem među njima predstavljaju najjednostavniji poluvodički sastavni dio, poluvodičku diodu. Stoga se pri opisanju svojstava PN-spoja ponekad govori o svojstvima (poluvodičke) diode.

PN-spoj u ravnotežnom stanju. Elementarni naboji (slobodni elektroni i šupljine) prisutni su, kako je upravo rečeno, u vrlo različitim koncentracijama u poluvodičima tipa P i N, koji sačinjavaju PN-spoj. Zbog toga nastaje, i prije nego što je narinut napon, strujanje većinskih nosilaca, tzv. *difuziona struja*, iz poluvodiča jednog tipa u poluvodič drugog tipa: elektroni sa strane N, gdje su oni većinski nosioci, difundiraju na stranu P, gdje ih ima znatno manje, a šupljine, koje su većinski nosioci u poluvodiču P, iz njega difundiraju na stranu N. Uslijed toga nastaju s jedne i s druge strane PN-spoja prostorni naboji, a između tih nabojâ uspostavlja se električno polje kojemu je smjer suprotan smjeru difuzione struje. To polje uzrokuje struju manjinskih nosilaca



Sl. 56. Shematski prikaz PN-spoja koji nije priključen na izvor struje

suprotno smjeru većinskih nosilaca, tzv. *driftnu struju*. Promjeni koncentracije nosilaca naboja u poluvodičima s obje strane PN-spoja odgovara pomak svih energetskih nivoa elektrona u tim poluvodičima i, prema tome, također Fermijevih nivoa. Ravnoteža između djelovanja razlike koncentracija i djelovanja polja nastalo uslijed stvaranja prostornih nabojâ, tj. ravnoteža između difuzione i driftne struje, uspostavlja se kad su Fermijevi nivoi s obje strane PN-spoja jednaki (sl. 55 d). U tom ravnotežnom stanju (kad nije priključen napon) driftna je struja jednaka difuzionoju struji, pa je ukupna struja jednaka nuli. U prelaznom području između poluvodiča koji tvore PN-spoj, a čija je debljina određena prostornim nabojima (to se prelazno područje naziva i *barijera*) potencijal opada od vrijednosti potencijala na strani N do potencijala na strani P; razlika između tih potencijala zove se *kontaktna razlika potencijala* U_K . Unutar tog područja jakost polja, tj. gradijent potencijala, prolazi kroz minimum (sl. 56).

PN-spoj nepropusno ili zaporno polariziran. Ako se na PN-spoj narine napon, spoj se vlada različito prema polaritetu napona. Ako je narinuti napon u odnosu prema području P pozitivan, iz barijere se šupljine potiskuju u stranu N, a elektroni u stranu P; barijera se osiromašuje na nosiocima naboja i uslijed toga postaje slabo vodljiva. Kad bi struju s obje strane vodili samo većinski nosioci, ona u smjeru od strane P ka strani N (u *zapornom* ili *nepropusnom smjeru*) ne bi uopće mogla teći kroz barijeru (*zaporni*

sloj), jer u njemu većinski nosioci putuju u suprotnom smjeru. Ali kako u poluvodičima obaju tipova ima i manjinskih nosilaca, a oni prenose naboj u smjeru suprotnom smjeru kretanja većinskih nosilaca, kroz zaporni sloj prolazi mala struja, koja o naponu postaje brzo neovisna (v. sl. 58, krivulja u trećem kvadrantu). Ta zaporna struja ovisi o količini manjinskih nosilaca s obje strane barijere, dakle o količini primjesa u poluvodičima i o temperaturi. Ako se na zaporni sloj narine vrlo visok napon, može nastati nagli porast jakosti struje kroza nj iz dva razloga. Ako je zaporna struja razmjerno velika, kristal se zagrijava; uslijed toga poraste koncentracija manjinskih nosilaca naboja, jakost struje poraste i kristal se još više zagrije, itd.; zagrijavanje i struja među sobom se pojačavaju dok ne nastane toplinski proboj. Ako je otpor zapornog sloja tolik da je zaporna struja vrlo mala te ne može zagrijati kristal, napon se može povisiti do te mjere da se energijom električnog polja izbacuju elektroni iz atoma u kristalnoj rešetki i postojeći elektroni ubrzaju toliko da sudarima iz rešetke izbacuju dalje elektrone. Tako se lančanim djelovanjem naglo povećava broj manjinskih nosilaca naboja, te nastane nagli porast jakosti struje (Zenerov efekt). Zaporna struja može se povećati ubacivanjem (injektiranjem) manjinskih nosilaca u barijeru iz trećeg poluvodičkog sloja (emitera).

PN-spoj propusno polariziran. Ako se na PN-spoj narine napon tako da potencijal područja P naraste, u prvom trenutku, kad je raspodjela naboja i potencijala u barijeri još nepromijenjena, nastat će s obje strane barijere jaka polja koja većinske nosioce masovno tjeraju u barijerni sloj, i ovaj uslijed toga postaje dobro vodljiv. Ravnotežni prostorni naboji barijere smanjuju se dok se razlika potencijala smanji za vrijednost narinutog napona. S porastom napona struja brzo raste jer broj nosilaca naboja koji mogu preskočiti potencijalnu barijeru s naponom raste približno eksponencijalno.

Uslijed nadolaska velikih količina nosilaca obaju vrsta u barijerni sloj, pojačava se njihova rekombinacija. Šupljine koje iz strane P ulaze u barijeru prolazeći kroz nju nestaju u mjeri u kojoj se rekombiniraju s elektronima što im struje ususret dolazeći sa strane N; prenošenje struje preuzimaju od šupljina sve više elektroni. Rekombinacija se zbiva praktički samo posredstvom primjesnih iona, na nju se stoga može utjecati dodavanjem većih ili manjih količina primjesa poluvodičima. Što je jača rekombinacija to brže opada gustoća nosilaca u barijeri, tj., to je tanja barijera. Ako je rekombinacija u barijeri slaba, mnogi elektroni i šupljine prolaze kroz barijeru a da se ne rekombiniraju i mogu kao manjinski nosioci difundirati duboko u područje P, odn. N.

Analitička obrada vođenja struje kroz PN-sloj. Dok na PN-sloj nije narinut napon, gustoća driftne struje šupljina jednaka je

$$J_{p\text{ drift}} = q_0 p \mu_p E = -q_0 p \mu_p \frac{dU}{dx}, \quad (21)$$

gdje znači: q_0 naboj elektrona, p koncentraciju šupljina, E jakost polja i μ_p pokretljivost šupljina.

U daljem izlaganju indeksom p, odn. n, označene su veličine koje se odnose na šupljine, odn. slobodne elektrone, a indeksom P, odn. N, veličine koje se odnose na poluvodički materijal tipa P, odn. tipa N.

Difuzionnoj struji šupljina gustoća je jednaka

$$J_{p\text{ dif}} = -q_0 D_p \frac{dp}{dx}, \quad (22)$$

gdje D_p znači konstantu difuzije šupljina. (Ona, npr., za germanijum na sobnoj temperaturi iznosi $D_p \approx 44 \text{ cm}^2/\text{s}$). Iz uvjeta da je ukupna struja šupljina jednaka nuli izlazi

$$J_p = J_{p\text{ dif}} + J_{p\text{ drift}} = -q_0 D_p \frac{dp}{dx} - q_0 p \mu_p \frac{dU}{dx} = 0.$$

Ako se primijeni tzv. Einsteinova relacija između pokretljivosti i konstante difuzije

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q_0} = U_T,$$

slijedi jednadžba

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dU}{U_T}. \quad (23)$$

U_T je naponski ekvivalent temperature ili temperaturni napon (v. jedn. 10).

Integriranjem ove jednadžbe u granicama od ravnotežne koncentracije šupljina p_{0P} na strani P do ravnotežne koncentracije šupljina p_{0N} na strani N dobiva se

$$p_{0N} = p_{0P} \cdot e^{-U_k/U_T}, \quad (24)$$

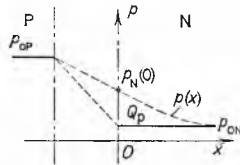
gdje je U_k kontaktna razlika potencijala.

Ista razmatranja vrijede i za elektrone. Ako se sa n označi koncentracija elektrona (tj. broj elektrona u jedinici volumena), za ravnotežnu koncentraciju elektrona na strani P vrijedi

$$n_{0P} = n_{0N} \cdot e^{-U_k/U_T}.$$

Ako se na PN-spoj dovede napon U u propusnom smjeru, koncentracija šupljina $p_N(0)$ na strani N neposredno uz barijeru (tj. za $x = 0$, sl. 57) postaje

$$p_N(0) = p_{0P} \cdot e^{-(U_k - U)/U_T}. \quad (25)$$



Sl. 57. Koncentracija šupljina uz PN-spoj

Koncentracija šupljina na strani N promijenila se uslijed narinutog napona U , a promjena koncentracije šupljina na strani P neposredno uz barijeru zanemarljivo je mala. Iz izraz (24) i (25) dobiva se

$$p_N(0) = p_{0N} \cdot e^{U/U_T}, \quad (26)$$

tj. koncentracija manjinskih nosilaca uz barijeru, pri naponu u propusnom smjeru koji smanjuje potencijal na barijeri, povećava se za faktor e^{U/U_T} .

Ukupna se struja šupljina dobija ako se odredi funkcija $p(x)$ po kojoj je raspoređena njihova koncentracija od barijere prema kraju područja N, jer će struja biti samo difuziona uz pretpostavku da je polje u poluvodiču van barijere jednako nuli (v. sl. 56) i moći će se odrediti iz jednadžbe (21). Funkcija $p(x)$ dobit će se rješanjem tzv. difuzione jednadžbe

$$D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p - p_{0N}}{\tau_p}, \quad (27)$$

gdje D_p znači difuzionu konstantu šupljina, koja ovisi o temperaturi i materijalu i ima dimenziju površina kroz vrijeme, τ_p vrijeme života šupljina, tj. vrijeme od njihova postanka do rekombinacije, a p traženu koncentraciju. Za statičke uvjete, kad je $\partial p / \partial t = 0$, rješenje jednadžbe (27) glasi:

$$p - p_{0N} = C_1 e^{-x/L_p} + C_2 e^{x/L_p}. \quad (28)$$

U toj je jednadžbi L_p tzv. difuziona duljina šupljina, tj. duljina puta na kojem koncentracija šupljina padne na dio $1/e$ od prvobitne vrijednosti. Ona iznosi

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}. \quad (29)$$

Uvrštenjem vrijednosti konstanti C_1 i C_2 , određenih rubnim uvjetima $p \rightarrow p_{0N}$ za $x \rightarrow \infty$ i $p = p_N(0)$ za $x = 0$, dobiva se

$$p - p_{0N} = p_{0N} (e^{U/U_T} - 1) e^{-x/L_p}. \quad (30)$$

Gustoća difuzione struje šupljina će prema izrazu (22) biti

$$J_{p\text{ dif}} = q_0 \frac{D_p}{L_p} p_{0N} (e^{U/U_T} - 1) e^{-x/L_p} \quad (31)$$

na rubu barijere, za $x = 0$ vrijednost te gustoće struje je

$$J_{p\text{ dif}}(0) = q_0 \frac{D_p}{L_p} p_{0N} (e^{U/U_T} - 1). \quad (32)$$

Analogna relacija dobiva se i za difuzionu struju elektrona na mjestu $x = 0$:

$$J_{n\text{ dif}}(0) = q_0 \frac{D_n}{L_n} n_{0P} (e^{U/U_T} - 1). \quad (33)$$

Struja kroz PN-spoj (pri narinutom naponu U) na udaljenosti x od ruba barijere jednaka je zbroju elektronske i šupljinske difuzione komponente i jednaka je struji na mjestu $x = 0$, tj.

$$J = \left(q_0 \frac{D_p}{L_p} p_{0N} + q_0 \frac{D_n}{L_n} n_{0P} \right) (e^{U/U_T} - 1). \quad (34)$$

Izraz u prvoj zagradi jednadžbe (34) predstavlja gustoću struje koja teče pri nepropusno polariziranoj PN-barijeri (za $|U| \gg U_T$) i koja se zove *reverzna struja zasićenja* J_s .

Prema tome je ukupna gustoća struje koja teče kroz PN-spoj

$$J = J_s (e^{U/U_T} - 1). \quad (35)$$

Svojstva PN-spoja. *Ispravljačko djelovanje PN-spoja* i mogućnost njegove primjene kao diode objašnjava jednadžba (35).

Kad se PN-spoj propusno polarizira, tj. kad se na njega priključi napon tako da se strana P učini pozitivnom u odnosu prema strani N, smanjuje se potencijalna razlika između strana P i N na $U_k - U$, što omogućuje znatan tok šupljina sa strane P na stranu N i elektronâ u suprotnom smjeru, pa poteče znatna struja. Pri povećanju pozitivnog napona U gustoća se struje J prema izrazu (35) brzo povećava (v. i sl. 58).

Kad se pri nepropusno polariziranom PN-spoju negativni napon na barijeri postepeno povećava, potencijalna razlika između strana P i N još više raste na $U_k + U$, šupljine i elektroni se udaljuju od spoja, kome se stoga otpor povećava. Difuziona struja glavnih nosilaca se smanjuje, pa prevladava mala struja manjinskih nosilaca, a ta struja već pri naponima $-U \geq 4 U_T$ doseže vrijednost blisku struji zasićenja.

Vrijednost ove struje je znatno temperaturno ovisna jer je ona direktno proporcionalna kvadratu vlastite koncentracije n_i poluvodiča, što slijedi iz jedn. (34):

$$J_s = q_0 n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_A} + \frac{D_n}{L_n N_D} \right),$$

gdje su N_A i N_D koncentracije akceptora i donora koje određuju i ravnotežne koncentracije manjinskih nosilaca, jer je $N_A \approx p_{0P}$, a $p_{0P} \cdot n_{0P} = n_i^2$ prema izrazu (20). Na sl. 58, koja je grafički prikaz jednadžbe (35), ucrtane su krivulje koje prikazuju karakteristike PN-diode za dvije različite temperature. (Na donjem dijelu osi ordinata primijenjeno je drugo mjerilo!)

Realne diode odstupaju od eksponencijalnog zakona zbog omskog pada napona na samom poluvodiču i zbog odvodnih struja na površini poluvodiča (sl. 59).

Kod silicijumskih su dioda vrijednosti reverznih struja zasićenja znatno manje nego kod germanijumskih, ali su i struje u propusnom smjeru za male napone vrlo male. Praktički znatna struja kroz silicijumske diode počinje teći na temperaturi 300 K ($U_T = 0,026$ V) tek kod propusnog napona 0,6 V.

Širina barijere l_B (v. sliku 56) povećava se s povećanjem nepropusnog napona na PN-spoju. Kad je barijera skokovita, (prelaz iz područja N u područje P nagao), njezina je širina proporcionalna drugom korijenu ukupnog napona na barijeri $l_B \sim \sqrt{U_k - U}$. Ukupni naboj nekompenziranih iona donora mora biti jednak ukupnom naboju nekompenziranih iona akceptora. Ako su koncentracije akceptora i donora različite, barijera ima različite ši-

rine s objiju strana. Barijera će se jače širiti na slabije onečišćenu stranu.

Proboj barijere. Kad se povećava napon u nepropusnom smjeru, dolazi do povećanja jakosti električnog polja E u barijeri. Čim jakost prekorači određenu granicu, dolazi do oslobađanja valencijskih elektrona iz atoma i do stvaranja parova elektrona i šupljina. Uslijed toga povećava se tok struje i dolazi do proboja barijere (v. lijevi dio krivulje na sl. 59). Za napone veće od probojnog takav proboj predstavlja praktički kratki spoj. Ovaj se mehanizam proboja zove *Zenerov proboj*; nastupa kad je sadržaj primjesa velik, naponi negativniji od -6 V, a otpor poluvodiča mali.

Do proboja može doći i uslijed toga što manjinski nosioci, koji čine reverznu struju, poprime toliku energiju da izbijaju valencijske elektrone, koji, opet, na svom putu izbijaju nove elektrone. Proces je kumulativan, dolazi do lavinskog efekta (usporedi *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 681) i do proboja koji se zove *lavinski proboj*. Obje vrste proboja nisu destruktivne; kad se ponovo smanji napon do ispod probojnog, struja je opet određena izrazom (35).

Utjecaj stupnja injekcije. Dobiveni izraz (35) za struju vrijedi u području male injekcije, gdje je promjena koncentracije većinskih nosilaca neposredno uz barijeru zanemarljiva. Ako je, međutim, koncentracija šupljina $p_N(0)$ neposredno uz barijeru ($x = 0$) ubačenih sa strane P na stranu N znatno veća od ravnotežne koncentracije većinskih nosilaca (elektrona) na toj strani (sl. 60), mora se koncentracija elektrona $n_N(0)$ povećati da bi se zadovoljila nabojna neutralnost. Zbog takve raspodjele elektronâ postojat će polje jakosti E_n takva smjera da će sprečavati struju elektronâ, ali potpomagati struju difuzije šupljina. Iz uvjeta da je struja elektronâ jednaka nuli,

$$J_n = q_0 \mu_n n E_n + q_0 D_n \frac{dn}{dx} = 0,$$

dobiva se, uz analognu primjenu Einsteinove relacije, za jakost polja E_n :

$$E_n = -U_T \cdot \frac{1}{n} \frac{dn}{dx}, \quad (36)$$

što uvrštenjem u jednadžbu za šupljinsku komponentu gustoće struje

$$J_p = q_0 \mu_p p E_n - q_0 D_p \frac{dp}{dx}$$

pokazuje da ako $p_N(0) \rightarrow n_N(0)$ i $\frac{dn}{dx} \rightarrow \frac{dp}{dx}$, šupljinska kompo-

nenta gustoće struje $J_p \rightarrow -2 q_0 D_p \frac{dp}{dx}$. Usporedba s izrazom (22)

pokazuje da uslijed velike injekcije difuziona konstanta teži k dvostruko većoj vrijednosti. U tom krajnjem slučaju bit će gustoća struje šupljina na mjestu $x = 0$ prikazana jednadžbom

$$J_p(0) = \frac{2 q_0 D_p p_{n0}}{L_p} (e^{U_B/U_T} - 1),$$

u kojoj umjesto napona U dolazi samo napon na barijeri U_B . Ta dva napona sada više nisu jednaka zbog postojanja polja jakosti E_n , stoga vrijedi jednadžba

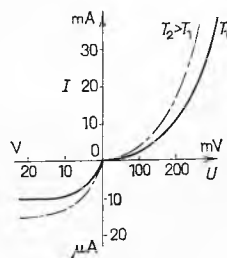
$$U_B = U - U_n. \quad (37)$$

Kako je jakost polja E_n dana izrazom

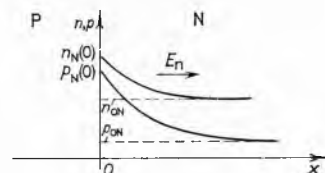
$$E_n = -\frac{dU_n}{dx},$$

iz izraza (36) integriranjem se dobiva

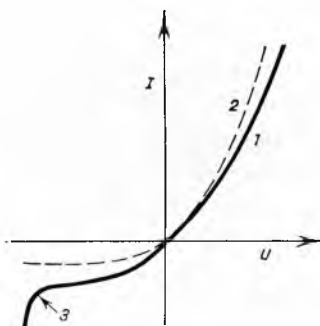
$$U_n = U_T \ln \frac{n_N(0)}{n_{0N}}. \quad (38)$$



Sl. 58. Grafički prikaz diodne struje prema jednadžbi (35)



Sl. 60. Naboj uz barijeru pri velikoj injekciji



Sl. 59. Karakteristika diode: 1 stvarno snimljena, 2 izračunata prema jednadžbi (57), 3 proboj

Za krajnju vrijednost pri velikoj injeksiji, za koju je $n_N(0) = p_N(0)$, vrijednost napona U_N iz izraza (38) može se izraziti jednadžbom

$$U_N = U_T \ln \frac{p_N(0) \cdot p_{0N}}{n_1^2},$$

koja se, uzevši u obzir da je, analogno izrazu (26),

$$p_N(0) = p_{0N} e^{U_B/U_T},$$

može pisati u obliku

$$U_N = U_T \ln \left(\frac{p_{0N}}{n_1} \right)^2 + U_B. \quad (39)$$

Jednadžbe (37) i (39) daju vrijednost napona na barijeri:

$$U_B = \frac{U}{2} - U_T \ln \frac{p_{0N}}{n_1}.$$

Konačni izraz za šupljinsku komponentu gustoće struje pri velikoj injeksiji težit će vrijednosti

$$J_p = \frac{2 q_0 D_p n_1}{L_p} (e^{U/2U_T} - 1). \quad (40)$$

Isti se izraz dobiva i za elektronsku komponentu struje u slučaju velike injeksije elektrona u područje P, pa ukupna gustoća struje kroz diodu u tom slučaju iznosi

$$J = \left(\frac{2 q_0 D_p n_1}{L_p} + \frac{2 q_0 D_n n_1}{L_n} \right) (e^{U/2U_T} - 1).$$

Nacrta li se karakteristika diode u području gdje je $e^{U/U_T} \gg 1$ u logaritamskom mjerilu za područje male i velike injeksije, dobiva se prema sl. 61 u području male injeksije pravac s nagibom $1/U_T$ a u području velike injeksije krivulja koja asimptotski teži pravcu s nagibom $1/2U_T$.

Kapacitet PN-spoja. Nepropusno polarizirana dioda predstavlja kondenzator čiji se kapacitet mijenja u ovisnosti o veličini inverznog napona.

Dinamička svojstva diode dobivaju se iz impedancije koju dioda pruža izmjeničnoj struji. Iz izraza (35) slijedi da je vodljivost diode g_0 pri sporim promjenama napona U prikazana jednadžbom

$$g_0 = \frac{dI}{dU} = \frac{I_s}{U_T} e^{U/U_T} = \frac{I + I_s}{U_T} \approx \frac{I}{U_T}, \quad (41)$$

gdje približan izraz za g_0 vrijedi kad je $I \gg I_s$, a to je uz propusnu polarizaciju diode već pod malim naponima. Uz brže promjene napona U dioda će pored omske vrijednosti predstavljati i izvjesnu reaktanciju (kapacitivni otpor) nakrcanog naboja manjinskih nosilaca. Vrijednost tog kapaciteta dobiva se kao derivacija po naponu U ukupnog naboja manjinskih nosilaca ubačenog s jedne strane barijere na drugu, tj.

$$C = \frac{dQ}{dU}.$$

Naboj šupljina Q_p ubačenih u stranu N jednak je površini ispod krivulje $p(x)$ na sl. 57. Vrijednost funkcije $p(x)$ dana je izrazom (30), tako da je naboj

$$Q_p = S q_0 \int_0^{\infty} p_{0N} (e^{U/U_T} - 1) e^{-x/L_p} dx = S q_0 p_{0N} (e^{U/U_T} - 1) \cdot L_p,$$

(gdje je S površina presjeka PN-sloja) odnosno kapacitet uslijed naboja šupljina je

$$C_p = \frac{dQ_p}{dU} = \frac{q_0 L_p}{U_T} S p_{0N} e^{U/U_T}.$$

Ovaj izraz može se jednostavnije napisati pomoću struje šupljina uzevši u obzir da je $e^{U/U_T} \gg 1$. U tom je slučaju, prema izrazu (32), sa $I_{p\text{diff}} = J_{p\text{diff}} S$,

$$C_p = \frac{I_{p\text{diff}}(0) L_p}{U_T D_p} = g_{0p} \tau_p,$$

gdje je sa g_{0p} , analogno izrazu (41), označen izraz

$$g_{0p} = \frac{I_{p\text{diff}}(0)}{U_T},$$

a τ_p je vrijeme života šupljine iz jedn. (29).

Na isti se način za difuzioni kapacitet uslijed elektrona ubačenih na stranu P dobiva

$$C_n = g_{0n} \tau_n.$$

Ukupni je kapacitet diode jednak zbroju difuzionih kapaciteta uslijed elektronâ i uslijed šupljina. Često je PN-spoj izveden tako da je jedna strana znatno vodljivija od druge. U tom je slučaju vrijednost difuzionog kapaciteta uslijed većinskih nosilaca iz slabo vodljive strane zanemarljivo mala, a ukupna struja vrlo približno jednaka difuzionoju struji većinskih nosilaca vodljivije strane. Onda je difuzioni kapacitet

$$C = g_0 \tau,$$

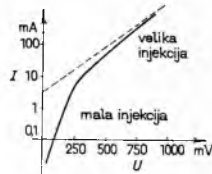
gdje se vrijeme života τ odnosi na šupljine ako je strana P vodljivija, a na elektrone ako je strana N znatno bolje vodljiva.

Utjecaj visokih frekvencija može se prikazati time što se umjesto realne difuzione duljine nosilaca L uzima njezina kompleksna vrijednost $L/\sqrt{1+j\omega\tau}$. Onda se za admitanciju diode dobiva kompleksan izraz

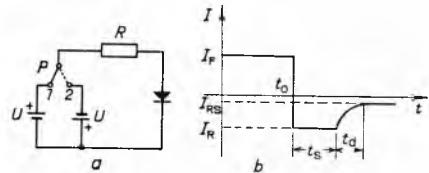
$$g = g_0 / \sqrt{1+j\omega\tau}, \quad (42)$$

u kojem je ω kružna frekvencija narinutog napona.

Impulsna svojstva diode također su posljedica nakrcanog naboja manjinskih nosilaca. Kad je dioda polarizirana propusno, tj. kad je preklopnik P na sl. 62a u položaju 1, kroz diodu teče struja I_F , a uz barijeru je koncentracija manjinskih nosilaca veća od ravnotežne koncentracije (kao što je to prikazano za šupljine na sl. 57). Prebacivanjem preklopnika u položaj 2 (sl. 62a) u trenutku t_0 (čime je shematski prikazan dolazak negativnog brzog impulsa), na diodu dolazi nepropusni polaritet. No nakrcani naboj manjinskih nosilaca ne može istog trenutka da nestane, pa struja kroz diodu u trenutku promjene napona promijeni smjer, ali je još uvijek znatnog iznosa I_R (sl. 62b) i ostaje stalna sve dok koncentracija nosilaca uz barijeru ne padne na vrijednost određenu priključenim naponom. Tek tada struja počinje eksponencijalno opadati prema svojoj stacionarnoj vrijednosti I_{RS} (nakon vremena t_s), koju dosegne nakon vremena t_d . Za diode koje treba da budu



Sl. 61. Karakteristika diode (u logaritamskom mjerilu) za male propusne napone pri maloj i velikoj injeksiji



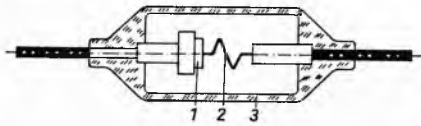
Sl. 62. Impulsna svojstva PN-spoja. a Ispitna shema, b karakteristika

brze sklopke, vrijeme $t_s + t_d$ (tj. vrijeme oporavka diode) mora biti kratko. Nakrcani naboj mora ili biti malen ili imati mogućnost da se brzo smanji.

Poluvodičke diode

Poluvodičke diode su elementi sa dvije elektrode koji imaju nelinearnu naponsko-strujnu karakteristiku. One se izrađuju od homogenog ili nehomogenog P- ili N-vodljivog materijala koji zajedno obrazuju PN-spoj, ili pak od istog materijala različitih koncentracija primjesa (NN^+ ili PP^+ , gdje gornji indeks plus označuje jače dopirani poluvodič), odn. od sljedea takvih materijala. Danas se proizvodi velik broj tipova dioda s vrlo različitim karakteristikama; one se znatno među sobom razlikuju po obliku i dimenzijama, po izboru upotrijebljenog materijala i po postupku kojim se proizvode. Dioda se danas, osim za ispravljanje, primjenjuju još i za niz drugih namjena (za stabilizaciju i ograničavanje napona, za uklapanje strujnih krugova, za miješanje visokofrekventnih signala, i dr.).

Tačkaste diode. Njihov je daleki prethodnik nekad mnogo upotrebljavani kristalni detektor (F. Braun 1874). One se sastoje od pločice N-vodljivog germanijuma na koji je pritisnut šiljak od volframske žice. U postupku formiranja, strujnim impulsima žica se zavari na pločicu i metalni atomi žice prodiru u poluvodič. Time se oko šiljka stvara P-vodljiv sloj i ostvaruje PN-spoj. Kontakt se može načiniti i s pomoću zlatne kuglice na vrhu žice. Takve diode sa zlatnom tačkom odlikuju se time što već pod malim naponima u propusnom smjeru kroz njih teku znatne struje. Tačkaste diode smještaju se u metalno ili stakleno kućište prevučeno neprozirnom bojom, da bi se spriječilo djelovanje svjetla (sl. 63).

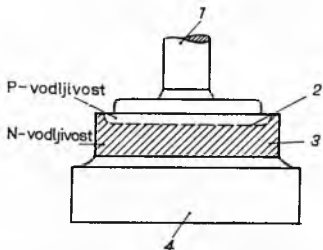


Sl. 63. Tačkasta dioda. 1 Pločica od poluvodiča, 2 žica sa šiljkom, 3 stakleno kućište

Takve se diode upotrebljavaju za uklapanje i isklapanje i miješanje struja najviših frekvencija, npr. u radarskim prijemnicima i drugim uređajima mikrovalne tehnike.

Slojne diode, germanijumske i silicijumske, imaju PN-spoj veće površine, koji se dobiva legiranjem ili difuzijom.

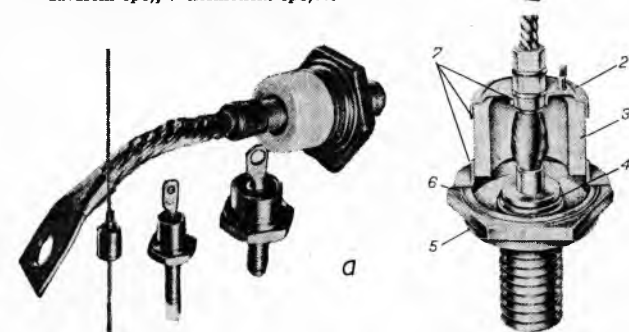
U procesu *legiranja* poluvodič se zagrijava do tačke taljenja zajedno s elementom koji služi kao donator ili kao akceptor. Nakon ohlađenja nastaje PN-spoj na granici legiranja s jednim i drugim materijalom. *Difuzija* je proces pri kome na povišenoj temperaturi atomi primjese (donora ili akceptora) s površine poluvodiča podloge prodiru (difundiraju) u njegovu dubinu uslijed toga što je koncentracija dotične primjese na površini znatno veća nego u unutrašnjosti poluvodiča. Na taj se način uz površinu dobiva poluvodič koji je po vodljivosti suprotnog tipa od podloge.



Sl. 64. Slojna dioda. 1 Katoda s priključkom, 2 PN-spoj, 3 osnova od Ge ili Si, 4 anodni priključak (Cu)

za veće struje takva su oblika da je omogućen dobar odvod topline. To se postiže bilo uvijčavanjem kućišta u rashladna tijela ili ukleštavanjem ispravljačke kapsule među rashladna ti-

Sl. 65. Silicijumske ispravljačke diode. a Različne veličine, b dioda za struje do 70 A; 1 dovod, 2 poklopac kućišta, 3 keramičko tijelo, 4 silicijumska pločica, 5 podnožje s vijkom koji se uvija u rebrasto rashladno tijelo, 6 zavareni spoj, 7 hermetički spojevi

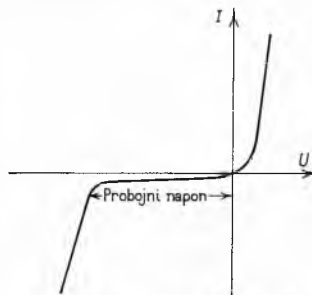


jela. Moguć je i smještaj više dioda u zajedničko kućište; to se upotrebljava naročito kad se dioda primjenjuje kao punovalni ispravljač.

Diode za impulsne sklopove. Vrijeme oporavka dioda koje rade u impulsnim sklopovima treba da je što manje. Jedan način da se smanji to vrijeme jest skraćivanje vremena života manjinskih nosilaca, što se postiže difuzijom zlata u silicijum, gdje atomi zlata tvore rekombinacione centre, tj. zauzimaju takve energetske nivoe da povećavaju rekombinaciju nakon promjene polariteta napona. Drugi način smanjenja vremena oporavka jest povećanje koncentracije primjese uz barijeru. Time se opet smanjuje vrijeme života manjinskih nosilaca u tom području u kojem i dolazi do povećanja koncentracije pri propusnoj polarizaciji barijere.

Diode sa zadržavanjem naboja ili diode sa stepenastim oporavkom (engl. step recovery), kod kojih je vrijeme t_s dosta dugo ali je vrijeme t_d ekstremno kratko (veličinskog reda nanosekundi) dobivaju se na sličan način. Pri reverziranju napona struja se vrlo brzo mijenja (krivulja promjene ima oblik stepenice) te se to upotrebljava na visokim frekvencijama za generaciju viših harmonika. Kratko vrijeme oporavka imaju i diode koje su načinjene sa spojem metal-poluvodič (*diode sa Schottkyjevom barijerom ili diode s vrućim nosiocima*); kroz njih struja teče uglavnom posredstvom većinskih nosilaca, tj. elektrona, i nema efekta zadržavanja manjinskih nosilaca.

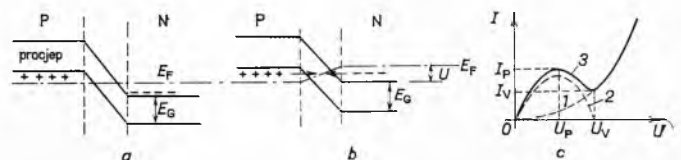
Probojne, Z- ili Zenerove diode (C. Zener je 1934 opisao po njemu nazvani proboj) jesu silicijumske diode s površinskim spojem. Njihovo je normalno područje rada u oblasti napona



Sl. 66. Karakteristika Zenerove diode

probijanja. U njima se iskorištava svojstvo PN-spoja da on pri lavinskom ili Zenerovom probiju (koji nije destruktivan) zadržava konstantan probojni napon skoro neovisan o struji kroz diodu (sl. 66). Vrijednost se probojnog napona osim toga mijenja samo vrlo malo s promjenom temperature, tako da se pomoću probojnih dioda može stabilizirati napon ili dobiti izvor struje referentnog konstantnog napona. Vrijednost probojnog napona određena je koncentracijom primjese na slabije vodljivoj strani barijere, što omogućuje da se izborom pogodnih koncentracija primjese dobiju diode s probojnim naponima od nekoliko volti do više stotina volti, ali se za stabilizaciju primjenjuju samo diode s manjim probojnim naponima (< 30 V). One se montiraju u jednaka kućišta kao i obične diode. Nominalne snage koje se na takvim diodama smiju disipirati (uz odvođenje topline) ovise o tipu diode, a imaju vrlo širok raspon od 400 mW do 50 W, ovisno o obliku i termičkim svojstvima kućišta.

Tunelska dioda (poznata i pod nazivom Esakijeva dioda prema japanskom fizičaru L. Esakiju koji ju je prvi teoretski obradio

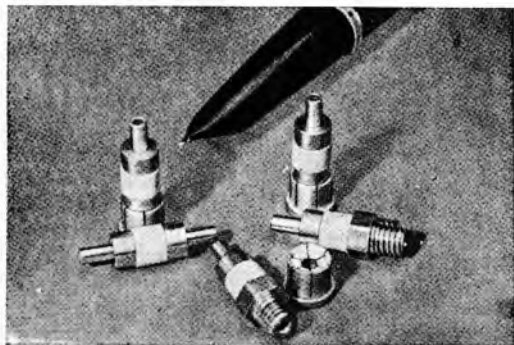


Sl. 67. Tunelska dioda. a Energetski dijagram bez narinutog napona, b energetski dijagram uz narinuti napon U, c karakteristika tunelske diode; 1 difuziona struja, 2 struja tuneliranja, 3 ukupna struja diode, E_F Fermijev nivo, E_G energetski procjep

i praktički dobio) jest poluvodički element koji se po karakteristikama i radu bitno razlikuje od običnih poluvodičkih dioda s površinskim slojem. Ona ima vrlo tanki PN-spoj izrađen od jako dopiranih, tj. degeneriranih poluvodiča. Fermijev nivo takvih poluvodiča tipa N nalazi se u vodljivom pojasu, a tipa P u valencijskom pojasu (sl. 67). Na vrlo uskoj barijeri takvog PN-spoja javlja se efekt tuneliranja (v. *Kvantna mehanika*), tj. elektroni i šupljine prolaze (tuneliraju) kroz barijeru iako im je energija manja od visine barijere, ukoliko se na drugoj strani barijere mogu pojaviti s istom energijom, tj. na istom energetskom nivou. Stoga se tuneliranje javlja kad s jedne strane barijere postoje elektroni,

a s druge šupljine na istom energetskom nivou. Kod degeneriranih poluvodiča to je upravo ostvareno pri propusnoj polarizaciji PN-spoja (sl. 67 b). U tom slučaju teče kroz diodu osim normalne difuzione struje (krivulja 1 na sl. 67 c) još i struja tuneliranja (krivulja 2). Ova struja najprije raste s naponom U , a zatim, kad elektroni na strani N poprime energije veće od energija šupljina na strani P, opada s daljim porastom napona do vrijednosti nula pri naponu U_v . Ukupna struja, jednaka zbroju struje difuzije i struje tuneliranja (krivulja 3) ima u dijelu karakteristike između U_p i U_v negativni otpor, tj. pri povećanju napona struja opada. Taj je dio karakteristike nestabilan i može se upotrijebiti za stvaranje oscilacija na vrlo visokim frekvencijama (do više GHz). Ova dioda može se upotrijebiti i kao vrlo brza sklopka. Povišenjem struje preko vrijednosti I_p napon se vrlo brzo poveća s vrijednosti U_p na vrijednost veću od U_v , odnosno smanjenjem struje ispod vrijednosti I_v napon se vrlo brzo smanji sa U_v na vrijednost manju od U_p .

Varaktori su diode u kojima se kapacitet PN-spoja mijenja pri promjeni napona. One se redovito upotrebljavaju u području nepropusne polarizacije PN-spoja. Izrađene su od silicijuma ili galijum-arsenida i dobivaju se difuzijom primjese u tzv. epitaksljalni sloj (v. str. 482), pri čemu se koncentracija primjese od površine prema unutrašnjosti poluvodiča mora mijenjati po određenom zakonu. Upotrebljavaju se za automatsku regulaciju frekvencije i pojačanje u parametarskim pojačalima za vrlo visoke frekvencije. Varaktor je prikazan na sl. 68.



Sl. 68. Varaktori

Silicijumski varaktori za niže frekvencije, zvani još i *varikap-dioide*, služe kao kondenzatori za ugađanje promjenom napona.

PIN- ili P-I-N-dioide sastoje se od dobro vodljivih područja P i N, između kojih je slabo vodljivo područje I (intrinsekno). Takva se dioda primjenjuje na vrlo visokim frekvencijama i u tom području predstavlja pri nepropusnoj polarizaciji visoku impedanciju. Pri takvoj polarizaciji barijera se širi kroz cijelo područje I, koje postaje izolator; PIN-dioda djeluje sada kao kondenzator s vrlo malim gubicima. Kapacitet kondenzatora neovisan je o naponu na diodi jer su promjene širine barijere u P- i N-području relativno male u odnosu prema širini intrinseknog područja I.

Pri dovođenju propusnog polariteta na diodu, elektroni iz područja N i šupljine iz područja P ubacuju se u područje I, kojemu se vodljivost mijenja sa strujom u propusnom smjeru. Na taj se način dobiva izvana dovedenim naponom kontrolirani otpor, koji može služiti kao sklopka ili modulator na vrlo visokim frekvencijama.

Readova dioda (sl. 69 a) sa strukturom P^+NIN^+ upotrebljava se na vrlo visokim frekvencijama kao pojačalo i oscilator. Ona radi lavinskom multiplikacijom i koristi se konačnim vremenom potrebnim za generiranje nosilaca u tom procesu. Ako je električno polje u diodi sastavljeno od istosmjernog komponente E_0 (sl. 69 b) i izmjenične komponente $E(t)$ (sl. 69 c) tako da se one zbrajaju (sl. 69 d) u trenutku t_0 , kad izmjenični napon ima maksimum, i ako to polje izazove lavinski proboj, koncentracija nosilaca q u sloju I počinje rasti (sl. 69 d). U trenutku $t = t_1$ (sl. 69 e), kad izmjenični napon mijenja polaritet, koncentracija q nosilaca već je poprimila znatnu vrijednost. Od trenutka t_1 do trenutka t_2 nema lavinske multiplikacije, ali se generirani nosioci pod utjecajem

istosmjernog polja gibaju prema području N^+ (sl. 69 f). U istom vremenskom intervalu izmjenično polje je suprotnog predznaka, što znači da nosioci predaju izmjeničnom polju energiju dobivenu od istosmjernog polja. Na taj način dolazi do pojačanja izmjeničnog napona na račun energije iz istosmjernog izvora. Na tom principu rade tzv. IMPATT-dioide (od engl. *IMP*act *AV*alanche *TR*ansit *T*ime — vrijeme proleta sudarne lavine), koje mogu biti građene i kao obične PN-dioide ili PIN-dioide, jer i kod ovih može doći do istog efekta.

Fotodioda su izvedene (pretežno od germanijuma) sa PN-spojem u kome fotoni svjetla generiraju u barijeri parove elektrona i šupljina. Zato je reverzna struja tih dioda znatno ovisna o intenzitetu svjetla, pa dioda može služiti kao indikator osvijetljenosti. Takve se diode stavljaju u okuće sa staklenom lećom (sl. 70). Fotodioda vrlo brzo reagira na promjene svjetla. One se stoga upotrebljavaju kao brze svjetlosne sklopke, npr. za čitanje perforiranih (bušenih) traka, kartica i sl. Često se i više fotodioda montira u isto kućište jedna do druge.

Na principu generiranja nosilaca pod utjecajem svjetla rade razne fotočelije, koje se koriste fotovodljivošću ili fotovoltaičnim efektom. Otpor fotovodljivog poluvodiča mijenja se s intenzitetom svjetla koje na njega pada. Kod fotovoltaičnog efekta stvara se na PN-spoju napon razmjern intenzitetu svjetla. Velike fotovoltaične čelije koje sunčevu svjetlosnu energiju pretvaraju u električnu energiju zovu se sunčane baterije. Izrađene su najčešće od selena.

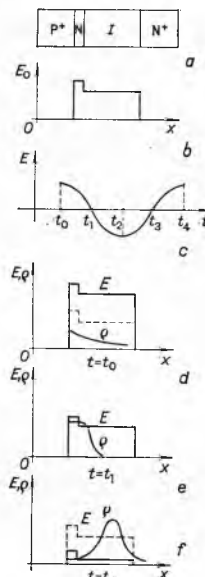
Elektroluminescentne diode koriste se svojstvom poluvodljivog cink-sulfida da u električnom polju emitira svjetlo. Električno polje u takvoj diodi stvara se između dviju elektroda, od kojih je jedna prozirna. Između njih je smješten poluvodič. Na elektrode se priključuje napon od ~ 100 V, frekvencije 400 Hz, ili izravno mrežni napon (v. *Električno osvijetljenje*, str. 273).

Svjetleća dioda ili poluvodički laser (lejser) izvor je koherentnog infracrvenog svjetla. Izrađen je od galijum-arsenida, GaAs. Uz odgovarajući napon propusno polariziranog PN-spoja (uz visoke gustoće struje) dio energije dobivene rekombinacijom elektrona i šupljina u barijeri pretvara se u koherentno svjetlo. Upotrebom optičkog rezonatora koji ostvaruju planparalelno izbrušene stijenke PN-spoja, dobiva se intenzivan snop takvog svjetla, koji izlazi s obje strane barijere. Služi za moduliranje svjetla i dobivanje svjetlosnih impulsa.

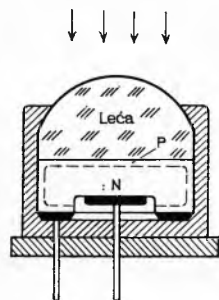
Tranzistori

Tranzistori su aktivni poluvodički sastavni dijelovi, redovito sa tri elektrode, koji u elektroničkim sklopovima pretežno služe za pojačanje (»tranzistorski efekti«), ali i za neke druge namjene, npr. kao sklopke. Oni u njima obavljaju iste funkcije kao i elektronke. Njihov je naziv kovanica engleskih riječi *Transfer Resistor* što znači prenosni otpornik. Ponekad ga nazivaju i kristalnom triodom. Tranzistor je bipolaran ako korisnu struju kroza nj prenose i manjinski i većinski nosioci, a unipolaran ako struja teče samo posredstvom većinskih nosilaca.

Bipolarni tranzistori. Ujedinjavanjem jednog PN- (odnosno NP-) spoja s jednim NP- (odnosno PN-) spojem u zajedničku celinu, s time da je razmak između objiju barijera vrlo mali, dobije se tranzistor strukture PNP (odnosno NPN) (sl. 71 a). Njihove pripadne simbole prikazuje sl. 71 b. Ovakvi bipolarni tranzistori, koji se izrađuju danas samo još u slojnoj izvedbi (v. str.

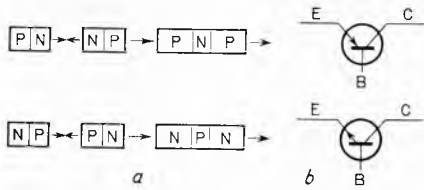


Sl. 69. Readova dioda. Shematski prikaz, b istosmjerno polje E_0 u diodi, c izmjenično polje $E(t)$, d ukupno polje E_0 u diodi i stvarna gustoća naboja q u trenutku t_0 , e polje i naboji u trenutku t_1 , f polje i naboji u trenutku t_2 .



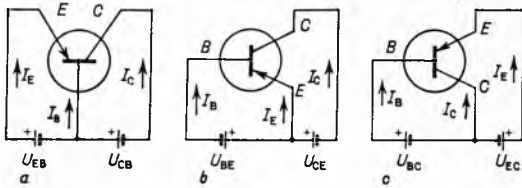
Sl. 70. Fotodioda, shematski prikaz

482), sastoji se od tri dopirana poluvodička sloja na koje su metalne elektrode priključene omksi, tj. tako da s poluvodičem ne sačinjavaju zaporni sloj. Dopirani se slojevi zovu: *baza* (oznaka B), *emiter* (oznaka E) i *kolektor* (oznaka C). Tranzistori se ugrađuju



Sl. 71. Bipolarni tranzistor tipa PNP (gore) i tipa NPN (dolje). a) Objašnjenje konstrukcije, b) simboli

u električne sklopove tako da im je ulaz u jednom krugu, a izlaz u drugom. Budući da tranzistor ima samo tri priključka (B, E i C), a ne četiri, to se tranzistori ugrađuju u električne sklopove tako da je jedna njihova elektroda zajednička ulaznom i izlaznom krugu. Osim toga mora kolektor, kojim prolazi izlazna struja, biti uvijek u izlaznom krugu. U vezi s time primjenjuju se tri načina uključivanja tranzistora: *sklop zajedničke baze*, *sklop zajedničkog emitera* i *sklop zajedničkog kolektora* (sl. 72 a, b, c). U praksi se naj-



Sl. 72. Tri moguća sklopa PNP-tranzistora. a) Sklop zajedničke baze, b) sklop zajedničkog emitera, c) sklop zajedničkog kolektora

češće primjenjuje sklop zajedničkog emitera jer je u toj sprezi snaga potrebna za upravljanje tranzistorom najmanja, a pojačanje najveće. Tranzistori u različnim sklopovima očituju i različite karakteristike.

Specifični otpor baze, tj. srednjeg sloja na sl. 73 a, koji je u PNP-tranzistorima tipa N, mnogo je veći od specifičnog otpora emitterskog sloja tipa P (na slici lijevo). Stoga je u emiteru ravnotežna koncentracija p_{0E} većinskih nosilaca, tj. šupljina, znatno veća ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) nego ravnotežna koncentracija elektrona u bazi n_{0B} ($\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$). Specifična vodljivost kolektorskog sloja (na slici desno) ne mora biti velika. Širina baze W je udaljenost između oba PN-spoja (G_1 i G_2). Ona mora biti znatno manja od difuzione duljine L_p manjinskih nosilaca (šupljina) u bazi, tj. mora biti zadovoljen uvjet $W \ll L_p$.

Priključe li se na tranzistor u sklopu zajedničke baze (sl. 73 a) izvori napona tako da emitterska barijera G_1 (između baze i emitera) bude propusno polarizirana, a kolektorska barijera G_2 (između baze i kolektora) nepropusno polarizirana, na pojedinim će mjestima vladati potencijal φ prema sl. 73 b. U tom se slučaju koncentracija šupljina u bazi p_B neće mijenjati prema jednadžbi (30) koja važi za PN-spoj sa širokim područjem N, već približno linearno (zbog $W \ll L_p$) kao što je to prikazano na sl. 73 c. Koncentracija šupljina u bazi $p_B(x)$ neposredno uz emittersku barijeru (tj. za $x = 0$) određena je izrazom (26), tj.

$$p_B(0) = p_{0B} \exp \frac{U_{EB}}{U_T}$$

Ona je znatno veća od normalne, ravnotežne koncentracije šupljina u bazi p_{0B} čim je napon emitterske barijere U_{EB} znatno veći od U_T ($\approx 0,026 \text{ V}$). Na rubu kolektorske barijere, za $x = W$, opet je prema izrazu (26)

$$p_B(W) = p_{0B} \exp \frac{U_{CB}}{U_T}$$

Kako je napon na kolektorskoj barijeri $U_{CB} \ll 0$, ta je vrijednost manja od p_{0B} . Energetski dijagram za propusno polariziranu

emittersku i nepropusno polariziranu kolektorsku barijeru prikazan je na sl. 73 d, na kojoj su naznačene i struje kroz barijere. Šupljinska komponenta emitterske struje I_{pE} je znatno veća od elektronske komponente emitterske struje I_{nE} zbog uvjeta da mora koncentracija šupljina u emiteru biti znatno veća od koncentracije elektrona u bazi, tj. $p_E \gg n_B$. Zbog vrlo uske baze šupljinska je komponenta emitterske struje I_{pE} gotovo jednaka šupljinskoj komponenti kolektorske struje I_{pC} , jer su zbog približno linearne promjene koncentracije šupljina gradijenti koncentracije šupljina na mjestu $x = 0$ i $x = W$ gotovo jednaki, tj.

$$\left. \frac{dp_B}{dx} \right|_{x=0} \approx \left. \frac{dp_B}{dx} \right|_{x=W}$$

a difuzione šupljinske struje direktno su proporcionalne gradijentu koncentracije prema izrazu (22). Omjer između šupljinske struje kolektora I_{pC} i ukupne emitterske struje I_E za tranzistor u sklopu zajedničke baze zove se *faktor strujnog pojačanja* i označava se slovom α . Prema definiciji je, dakle,

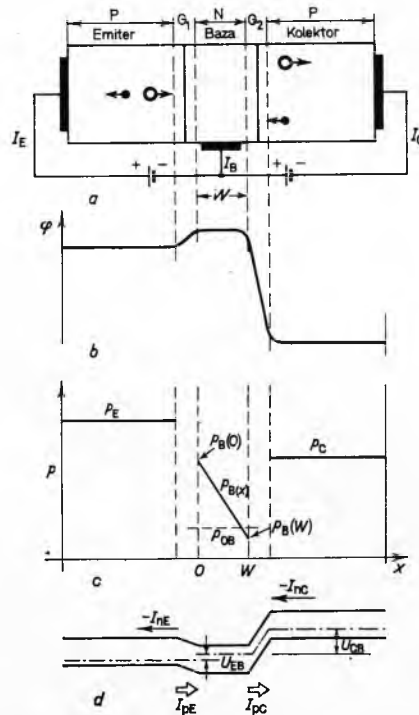
$$\alpha = \frac{I_{pC}}{I_E} \quad (43)$$

Izvestan dio šupljina ubačenih iz emitera u bazu gubi se pri prolasku do kolektorske barijere uslijed rekombinacije s elektronima. Omjer između šupljinske komponente struje na kolektoru I_{pC} i šupljinske komponente na emitterskoj barijeri I_{pE} , označen slovom β^* , iznosi

$$\beta^* = \frac{I_{pC}}{I_{pE}} \quad (44)$$

i zove se *transportni faktor*. On je zbog vrlo uske baze i male rekombinacije u njoj po vrijednosti blizak jedinici. Strujno pojačanje α prema (43) i (44) iznosi

$$\alpha = \frac{I_{pE}}{I_E} \beta^*$$



Sl. 73. Tranzistor tipa PNP i njegove karakteristike. a) Shematski prikaz, b) potencijal na različitim mjestima tranzistora pri $U_{CB} = \text{konst.}$, c) dijagram koncentracije šupljina p , d) dijagram energetskih nivoa

Omjer I_{pE}/I_E jest omjer između šupljinske struje i ukupne struje emitera, dakle *faktor injekcije šupljina* u emiter; on se označava slovom γ . Strujno pojačanje α je, prema tome, produkt transportnog faktora β^* i faktora injekcije γ : $\alpha = \beta^* \cdot \gamma$.

Ukupna emitorska struja jednaka je zbroju šupljinske i elektronske komponente, koje se mogu izračunati prema izrazu (22) i (33) ako se ovaj drugi napiše za elektrone ubačene iz baze u emiter. Napon U je u ovom slučaju napon U_{EB} , koji će biti znatno veći od U_T , pa je $\exp \frac{U_{EB}}{U_T} \gg 1$, te se jedinica u izrazu (33) može zanemariti. Za gradijent koncentracije šupljina u bazi vrijedi $\frac{dp_B}{dx} =$

$= -\frac{p_B(0)}{W}$ zbog linearne promjene koncentracije šupljina. Zbog toga je faktor injekcije

$$\gamma = \frac{I_{pE}}{I_E} = \frac{I_{pE}}{I_{pE} + I_{nE}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{nE}}{I_{pE}}} = \frac{1}{1 + \frac{q_0 D_{nE} n_0 E W}{q_0 D_{pB} p_{0B} L_{nE}}} = \frac{1}{1 + \frac{q_E W}{q_B L_{nE}}}$$

q_B i q_E su specifični otpori baze i emitera dobiveni uz pretpostavku da su pokretljivosti elektrona i šupljina u bazi i emiteru jednake.

Transportni faktor β^* tranzistora s dovoljno uskom homogenom bazom dobiva se rješenjem jednadžbe kontinuiteta za tranzistor, a za bazu širine W s difuzionom duljinom šupljina L_{pB} iznosi

$$\beta^* = \frac{1}{\cosh \frac{W}{L_{pB}}} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_{pB}} \right)^2$$

Ovaj izraz vrijedi na niskim frekvencijama. Na visokim frekvencijama efekt je sličan kao kod diode i umjesto realne difuzione duljine L_{pB} uzima se kompleksna vrijednost $L_{pB}/\sqrt{1 + j\omega\tau_{pB}}$, gdje τ_{pB} znači vrijeme života šupljina u bazi. Uz tako određenu vrijednost transportnog faktora na višim frekvencijama dobije se frekvencija pri kojoj β^* spadne na dio $1/\sqrt{2}$ njegove istosmjerne vrijednosti. Ta je granična kružna frekvencija ω_g transportnog faktora dana izrazom

$$\omega_g = \frac{2,43 D_{pB}}{W^2}, \quad (45)$$

u kojemu je D_{pB} difuziona konstanta šupljina u bazi.

Prema sl. 73 d ukupna kolektorska struja I_C , definirana kao struja koja teče u kolektor, jednaka je zbroju šupljinske i elektronske komponente uzete s negativnim predznakom

$$I_C = -I_{pC} + I_{nC}. \quad (46)$$

Uz upotrebu izraza (43) za šupljinsku komponentu i označujući elektronsku komponentu manjinskih nosilaca sa I_{CB0} , izraz (46) poprima oblik

$$I_C = -aI_E + I_{CB0}. \quad (47)$$

Analogno dobiva se i izraz za emitorsku struju

$$I_E = -I_{nE} + I_{pE}.$$

Zbroj svih struja koje teku u tranzistor mora biti jednak nuli, pa se za baznu struju dobiva izraz

$$I_B = -I_C - I_E = (I_{pC} - I_{pE}) + I_{nE} - I_{CB0}. \quad (48)$$

Član u zagradi izraza (48) predstavlja razliku šupljinske struje kolektora i emitera, a to je struja uslijed rekombinacije šupljina. Tu struju čine elektroni koje treba dovesti bazi da bi se omogućila rekombinacija. Drugi je član elektronska struja iz baze u emiter I_{nE} , a treći član je struja manjinskih nosilaca I_{CB0} kroz nepropusno polariziranu kolektorsku barijeru i predstavlja reverznu struju zasićenja kolektorske barijere.

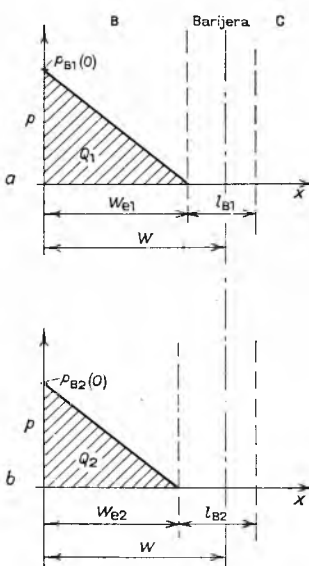
Za šum tranzistora v. *Elektronika, uređaji*.

Statičke karakteristike bipolarnih tranzistora. Za praktičnu primjenu tranzistora važno je poznavati odnose između pojedinih struja i između pojedinih struja i napona. Jakosti tih struja i njihovi odnosi mogu se utvrditi analitički, ali tako dobivene vrijed-

dnosti ponešto odstupaju od stvarnih zbog niza razloga. Stoga isporučioi tranzistora za svaki tip i za pojedine sprege daju tzv. statičke karakteristike, slično kao što to biva s elektronkama. Te karakteristike snimaju se istosmjernom strujom postupno i predstavljaju srednju vrijednost karakteristika velikog broja tranzistora; karakteristika za pojedini primjerak može jako odstupati od te srednje karakteristike. Snimaju se: izlazna, ulazna, prijenosna i povratna karakteristika, i to za sve tri vrste sprege tranzistora. Iz tih karakteristika mogu se dobiti parametri tranzistora.

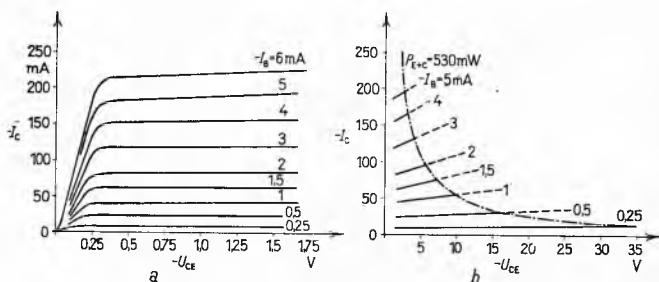
U sklopu zajedničke baze emitorski je krug ulazni, kolektor je spojen u izlazni krug, a baza je zajednička ulaznom i izlaznom krugu (sl. 72 a). Ovisnost istosmjerne kolektorske struje I_C o istosmjernom kolektorskom naponu U_{CB} uz emitorsku struju I_E kao parametar, prikazuje polje statičkih izlaznih karakteristika tranzistora (sl. 74). Kolektorska struja gotovo je jednaka ulaznoj emitorskoj struji i praktički neovisna o naponu kolektora, dok je on negativan.

Mali porast kolektorske struje postoji uslijed promjene efektivne širine baze W_e pri promjeni kolektorskog napona (Earlyjev efekt), kao što je to prikazano na sl. 75. Povećanje kolektorskog napona (u nepropusnom smjeru) uzrokuje naime povećanje širine barijere od l_{B1} na l_{B2} i smanjenje efektivne širine baze od W_{e1} na W_{e2} . Da bi emitorska struja ostala nepromijenjena, — jer to je uvjet uz koji su dobivene izlazne karakteristike na sl. 74 — mora gradijent koncentracije uz emitorsku barijeru ostati isti, a to je moguće jedino ako se smanji napon emiter-baza, a time i ukupni naboj Q šupljina u bazi prikazan kao površina šrafiranog trokuta na sl. 75. Smanjenje ukupnog naboja šupljina uzrokovat će i manji gubitak šupljina uslijed rekombinacije i povećanja šupljinske komponente kolektorske struje, a prema izrazu (46) i ukupne (negativne) kolektorske struje.



Sl. 75. Utjecaj širine barijere l_B na efektivnu širinu baze W_e i naboj u bazi Q . a Uža barijera, b šira barijera

Za negativne napone U_{CB} tranzistor radi u aktivnom području u kome je kolektorska barijera nepropusno polarizirana. Za pozitivne napone U_{CB} na sl. 74 kolektorska barijera postaje propusno polarizirana i kolektorska se struja brzo smanjuje. Ovo područje je područje zasićenja tranzistora.



Sl. 76. Izlazna karakteristika tranzistora ACY 24 u spoju zajedničkog emitera — $I_C = f(-U_{CE})$ uz parametar $-I_B$. a Karakteristika snimljena s malim naponima U_{CE} , b karakteristika za velike napone U_{CE}

U sklopu zajedničkog emitera ova je elektroda tranzistora uvrštena u ulazni i izlazni krug kako je to prikazano na sl. 72 b. Izlazne karakteristike tranzistora u tom sklopu prikazuje sl. 76. Područje zasićenja, u kojem se kolektorska struja znatno mijenja, ovdje pada i u područje malih negativnih napona U_{CE} (sl. 76 a). U aktivnom području porastu struje pri povećanju napona razlog je isti kao i kod spoja sa zajedničkom bazom, ali je taj porast znatniji (sl. 76 b) jer karakteristike zahtijevaju konstantnost bazne struje I_B , a ne emitterske struje.

Iz uvjeta da je zbroj svih struja koje na sl. 72 a teku u tranzistor jednak nuli,

$$I_B + I_C + I_E = 0, \quad (49)$$

i izraza (47), dobiva se za kolektorsku struju I_C u spoju zajedničkog emitera jednadžba

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CE0}}{1-\alpha}. \quad (50)$$

Uvrsti li se u izraz (50)

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad I_{CE0} = \frac{I_{CB0}}{1-\alpha},$$

on poprima oblik

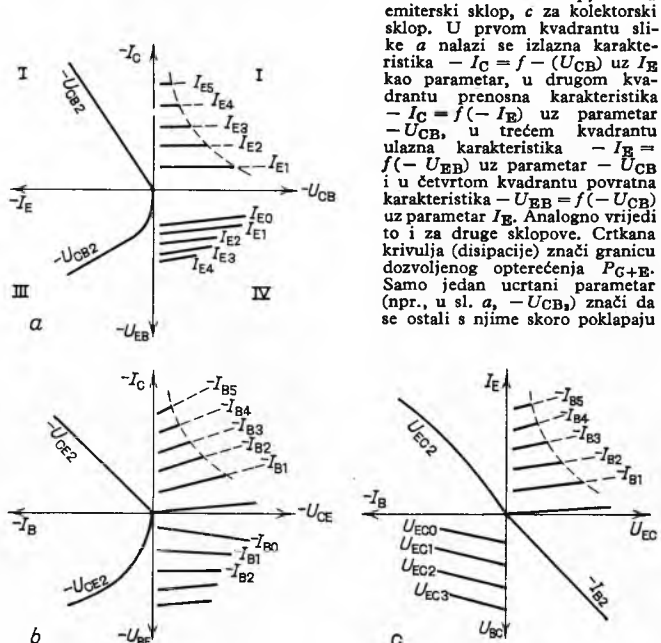
$$I_C = \beta I_B + I_{CE0},$$

u kojem je β strujno pojačanje tranzistora u spoju zajedničkog emitera, a I_{CE0} reverzna struja zasićenja u istom spoju. Kako je α vrlo blisko jedinici, strujno pojačanje β je znatno i za dobre tranzistore iznosi 20...200. Isto tako može biti znatan i iznos struje I_{CE0} . Kako je to reverzna struja barijere (uz otvoren emiter), koja je jako ovisna o temperaturi, veliki iznosi te struje uzrok su temperaturnoj nestabilnosti tranzistora.

Na visokim frekvencijama dolazi do opadanja strujnog pojačanja β zbog frekvencijske ovisnosti transportnog faktora β^* i parazitnih kapaciteta kolektora. Sa f_β označuje se ona frekvencija kod koje β spadne na dio $1/\sqrt{2}$ svoje istosmjerne vrijednosti, a sa f_T ona frekvencija kod koje β poprima iznos jednak jedinici.

Proizvođači daju ponekad za svoje tranzistore sve vrste karakteristika za sve tri sprege. U tom je slučaju na istoj slici u svakom kvadrantu predstavljena druga karakteristika (sl. 77 a, b, c).

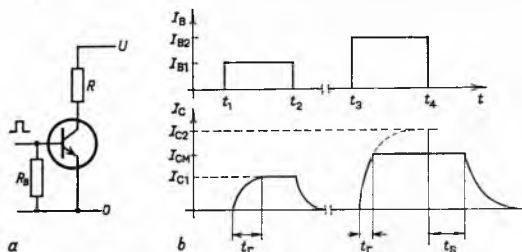
Sl. 77. Karakteristike tranzistora: a za bazisni sklop, b za emiserski sklop, c za kolektorski sklop.



Povećanje gornje granične frekvencije tranzistora f_β postiže se (u tzv. drift-tranzistorima) pogodnom raspodjelom udifundiranih primjesa u bazi, zbog čega se pojavljuje dodatno polje koje ubrzava kretanje šupljina od emitera prema kolektoru i time smanjuje vrijeme prolaska nosilaca kroz bazu. Povećanju gornje granične

frekvencije doprinosi i smanjenje vremena života šupljina u bazi, što se (kao kod dioda) postiže dodavanjem zlata u silicijum. Smanjenje širine baze W ima isti efekt, pa tranzistori za vrlo visoke frekvencije imaju ekstremno usku bazu od $W \approx 0,15 \mu m$.

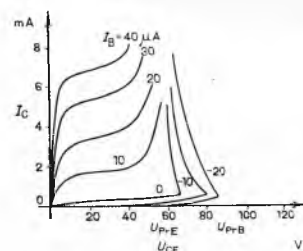
Pri radu tranzistora kao sklopke zahtijeva se brzo prelaženje iz stanja nevođenja u stanje vođenja velike struje i obrnuto, što se postiže dovođenjem impulsa bazne struje I_B . Na sl. 78 b prikazani su impulsi bazne struje amplitude I_{B1} i I_{B2} dovedeni bazi NPN-tranzistora u emiserskom sklopu (sl. 78 a). Struja I_{B1} uzrokovat će kolektorsku struju $I_{C1} = \beta I_{B1}$, no kolektorska struja neće odmah poprimiti svoju maksimalnu vrijednost, već će do nje rasti eksponencijalno. To je posljedica nagomilavanja naboja u bazi i zato će proći određeno vrijeme porasta t_r za koje kolektorska struja poraste sa 0,1 na 0,9 svoje konačne vrijednosti. Isto



Sl. 78. Tranzistor kao sklopka. a Shema spoja, b strujni impulsi na bazi (pobuda) i izgled kolektorske struje (odziv)

tako, pri naglom smanjenju bazne struje na nulu, kolektorska struja opadati će eksponencijalno. Ako je, međutim, impuls bazne struje I_{B2} tako velike amplitude da bi pripadna kolektorska struja $I_{C2} = \beta I_{B2}$ bila veća od maksimalne moguće vrijednosti I_{CM} , koja je određena naponom U i otporom R , tranzistor će zaći u zasićenje (napon kolektora pada gotovo na nulu). Vrijeme potrebno za prijelaz u puno vođenje t_r sada je znatno kraće (sl. 78 b), ali se u bazi nakrcao naboj veći od onog koji je potreban za tok struje I_{CM} . To će imati utjecaja pri vraćanju tranzistora u stanje nevođenja, kad u trenutku t_4 bazna struja postaje jednaka nuli, $I_{B2} = 0$. Tada kolektorska struja još neko vrijeme t_s zadržava konstantnu vrijednost, dok se ne odstrani »suvišan« naboj nakrcao u bazu, i tek tada počinje eksponencijalno opadati.

Vrlo brzo prebacivanje tranzistora iz stanja nevođenja u stanje vođenja postiže se radom tranzistora u području lavinskog proboja. Ako se poveća kolektorski napon U_{CE} do vrijednosti napona proboja između kolektora i baze U_{prB} , dolazi do lavinske multiplikacije nosilaca u kolektorskoj barijeri. Uslijed toga doći će do ubacivanja nosilaca u bazu preko kolektorske barijere, pa bazna struja koja nadoknađuje rekombinaciju u normalnom radu uopće nije potrebna, ili je čak potrebna bazna struja polariteta suprotnog polariteta struje pri normalnom radu. Uz tako uspostavljen probij poteče i emitterska struja i uvjeti se probija mijenjaju. Uslijed tranzistorskog efekta probijni napon između kolektora i emitera U_{prE} manji je od napona U_{prB} (sl. 79). Posljedica toga je smanjenje kolektorskog napona povećavanjem struje, tj. dobiva se predio karakteristike s »negativnim otporom«; prelaz preko tog područja vrlo je brz. Uz bazne struje normalnog polariteta također dolazi do lavinskog probija pri naponu U_{prE} , ali prelaz iz područja malih struja u područje velikih struja nije brz.



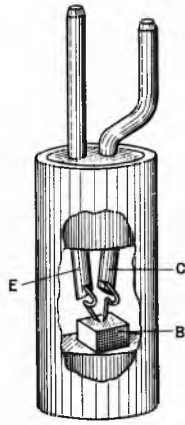
Sl. 79. Izlazna karakteristika NPN-tranzistora u području lavinskog probija

Konstrukcija i tehnologija bipolarnih tranzistora. Tačkasti tranzistori imaju dva šiljasta kontakta pritisnuta na kristal germanijuma N-vodljivosti, koji služi kao baza (sl. 80). Razmakom među kontaktima određena je širina baze (veličinskog reda 100 μm). Ispod pritisnutih kontaktnih šiljaka sami se stvaraju tanki P-vodljivi slojevi. Formiranjem pomoću jakih strujnih impulsa taj se P-sloj ispod šiljka kolektora još i proširuje. Šiljci sa svojim

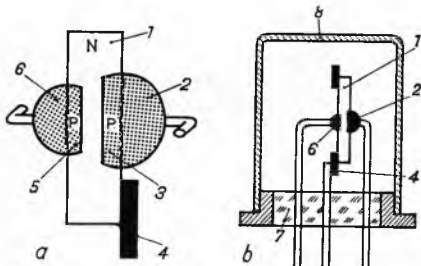
P-slojevima tvore emiter E i kolektor C. Baza B spojena je na metalno kućište. Na tom su se principu izrađivali prvi tranzistori; danas se ova vrsta tranzistora više ne primjenjuje.

Vučeni tranzistori dobivaju se izvlačenjem kristala germanijuma ili silicijuma iz njihove taline. Talina se naizmjenično dopira donorima i akceptorima i tako se dobije struktura PNP ili NPN na izvučenom šipki monokristala. Šipka se nakon ohlađenja reže, a pojedinim se odsječcima dodaju omski priključni kontakti. Talina može biti dopirana i objema vrstama primjesa, a širine područja P ili N u izvučenom kristalu dobiju se ovisno o brzini ili temperaturi pri izvlačenju. Na tom su se principu izrađivali prvi slojni tranzistori.

Legirani tranzistori dobivaju se legiranjem germanijumske šipke ili ploče tipa N kuglicama indijuma (sl. 81 a). Indijum prodire u toku procesa legiranja s obje strane u germanijum stvarajući u njemu područja tipa P. Na taj se način dobije s jedne strane kolektor (obično nešto veće površine), a s druge strane emiter PNP-tranzistora. Uski dio šipke ili pločice između dva legirana dijela, koji je ostao N-vodljiv, služi kao baza. Tranzistor se ugra-



Sl. 80. Tačkasti tranzistor. B baza, E emiter, C kolektor

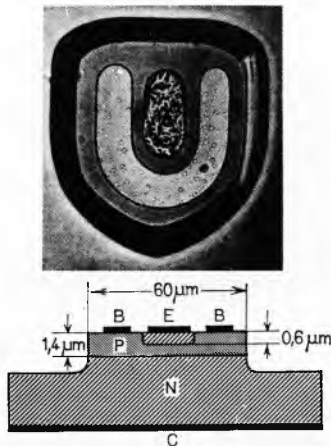


Sl. 81. Legirani tranzistor. a Pločica baze s ulegiranim kuglicama indijuma, b legirani tranzistor ugrađen u kućište; 1 baza, pločica od germanijumskog poluvodiča tipa N, 2 kolektor od indijuma, 3 kolektorsko područje P, 4 priključak baze, nikalij ili kovar, 5 emittersko područje P, 6 emiter od indijuma, 7 osnovna ploča od stakla, 8 metalno kućište

đuje u kućište koje je ispunjeno nekim toplinski dobro vodljivim materijalom, a njegovi se izvodi vode kroz stakleno dno iz kućišta (sl. 81 b). Po ovom se postupku izrađuju danas germanijumski standardni i industrijski tranzistori za niske frekvencije.

Upotrebom **difuzije** (kao i kod poluvodičkih dioda), zajedno s legiranjem, mogu se dobiti tranzistori s vrlo uskom bazom. Difuzija je proces koji se sve više primjenjuje za dobivanje različitih vrsta tranzistora.

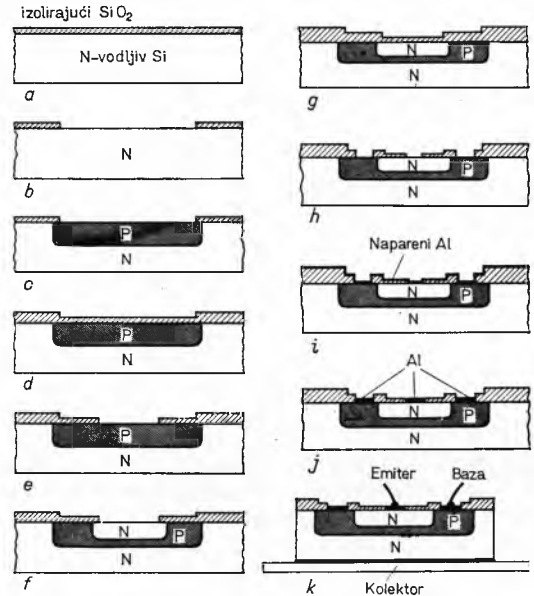
Mesa-tranzistor. Difuzijom akceptora u germanijumski poluvodič tipa N (sl. 82 a) dobiva se sloj tipa P koji će činiti bazu B. Zatim se difuzijom donora u samo jedan dio P-vodljivog sloja stvara opet tip N, koji čini emiter E, a sloj tipa P ispod njega postaje time vrlo tanak. Nakon što su PN-spojevi gotovi, oni se zaštićuju prikladnim slojem, a zatim se jetkanjem odstranjuje sav suvišni materijal oko tranzistora tako da iz osnove viri samo još konstrukcija tranzistora kao neka visoravan (špan. mesa = stol, visoravan, sl. 82). Nakon skidanja zaštitnog sloja i metaliziranja elektroda učvršćuju se na



Sl. 82. Mesa-tranzistor. Konstrukcija PNP-tranzistora AF 239 (Siemens) (do lije) i pogled na sistem tranzistora (gore)

njih vrlo tanke priključne žice. Ovi se tranzistori primjenjuju najčešće za visoke frekvencije. Pri izradi mesa-tranzistora primjenjuju se različiti proizvodni postupci (tehnika maski, fotolakova i druge).

Planarni tranzistori dobivaju se također pomoću difuzije a primjenom tzv. planarne tehnike. Podloga od N-vodljivog silicijuma, koja služi ujedno i kao kolektor, osnova je svih daljih operacija. Njezina se polirana površina najprije oksidira (sl. 83 a) i time prevuče izolacionim slojem silicijum-dioksida (SiO_2), koji u toku cijele proizvodnje ima važnu ulogu kao zaštitni sloj. Jetka-



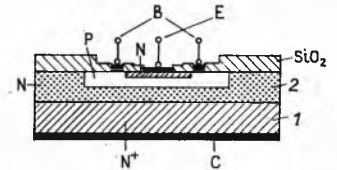
Sl. 83. Tok proizvodnje planarnog tranzistora

njem taj se zaštitni sloj skida na određenim mjestima (sl. 83 b) i kroz tako nastalu masku difundiraju primjese, čime se stvara P-vodljiva zona (sl. 83 c). Ponovnim oksidiranjem (sl. 83 d) i jetkanjem određenih manjih ploha (sl. 83 e) stvara se mjesto za emiter. Drugom difuzijom s primjesama suprotnog tipa u predio dobiven baznom difuzijom stvara se N-vodljiva zona emitera (sl. 83 f). Nakon ponovnog oksidiranja (sl. 83 g) jetkanjem se naprave otvori za priključke (sl. 83 h). Napareni metalni sloj aluminijuma (sl. 83 i) skida se na svim nepotrebnim mjestima jetkanjem (sl. 83 j), nakon čega se privare priključne žice za emiter i bazu i prilemi kolektor (sl. 83 k) na metalni nosač, koji ujedno služi kao kontakt.

Epitaksijalni planarni tranzistori. Osim difuzije u ovim se tranzistorima primjenjuje i epitaksija [tj. rast monokristala na podlozi (ili tzv. kloni) istog sastava i/ili iste kristalne strukture]. Ovaj se postupak primjenjuje za dobivanje slojeva različite koncentracije. Poboļšana svojstva planarnih tranzistora postižu se, naime, ako se na poluvodič tipa N, koji služi kao kolektor, prije difuzije nanese tzv. epitaksijalni sloj silicijumskog poluvodiča istog tipa ali velikog specifičnog otpora (sl. 84).

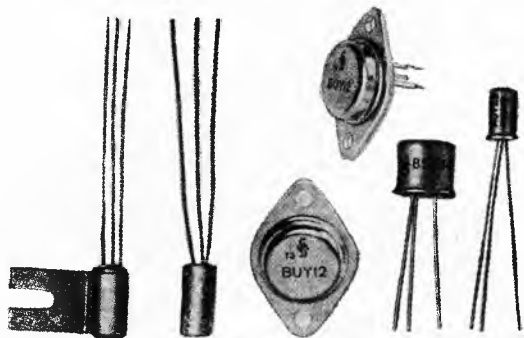
Fototranzistori su slojni bipolarni tranzistori koji rade na istom principu kao i fotodiode. Kolektorska barijera je fotoosjetljiva (naročito u infracrvenom području), a uslijed tranzistorijskog efekta dobiva se veća osjetljivost nego kod dioda. Osvjetljavanjem nepropusno polarizirane kolektorske barijere generiraju se u njoj parovi nosilaca, koji, jednako kao bazna struja običnog tranzistora, uzrokuju ubacivanje manjinskih nosilaca kroz emittersku barijeru.

Kućišta tranzistora. Dobivene strukture tranzistora zatvaraju se u metalna ili plastična hermetički zatvorena kućišta koja imaju izvode za emiter, bazu i kolektor. Vrlo tankim žicama spajaju se



Sl. 84. Shematski prikaz konstrukcije epitaksijalnog planarnog tranzistora. E priključak emitera, B priključak baze, C priključak kolektora; 1 niskoomski kolektorski sloj (N^+), 2 visookoomski kolektorski spoj

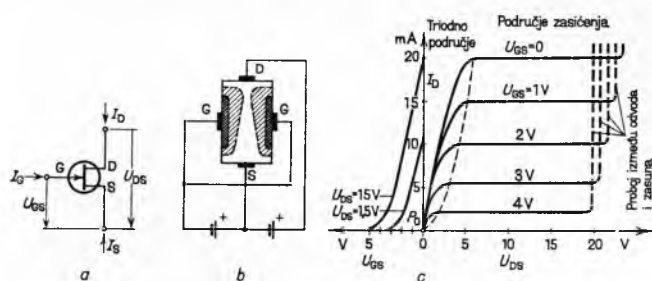
prije samog zatvaranja kućišta izvodi s pripadnim dijelovima na poluvodičkoj strukturi. Tranzistori namijenjeni za velike snage imaju kućište s velikim rashladnim površinama, a kolektor je najčešće spojen na samo kućište. Sl. 85 prikazuje vanjski izgled nekoliko tipova tranzistora.



Sl. 85. Različite vrste kućišta tranzistora

Unipolarni tranzistori. Struja u ovim tranzistorima teče (dručkije nego u običnim tranzistorima) posredstvom većinskih nosilaca, a njome se upravlja električnim poljem. Stoga se ti tranzistori zovu i tranzistori s efektom polja ili *fet* (FET od engl. *Field Effect Transistor*). Za razliku od bipolarnih, to su naponom upravljivi elementi koji imaju veliku ulaznu impedanciju. Kako im struja potječe od većinskih nosilaca, ona nije toliko temperaturno osjetljiva kao struja bipolarnih tipova.

Spojni unipolarni tranzistor ili unipolarni tranzistor sa PN-spojem (simbol na sl. 86 a) sastoji se od pločice N-vodljivog poluvodiča koji čini vodljiv kanal (stoga se govori i o P- ili N-kanalnom spojnem unipolarnom tranzistoru). Na jednom kraju



Sl. 86. Spojni unipolarni tranzistor. a) Simbol s oznakama napona i struja, b) priklijučak i način djelovanja, c) karakteristike $I_D = f(U_{DS})$ uz parametar U_{GS} i $I_D = f(U_{GS})$ uz parametar U_{DS}

te pločice (sl. 86 b) nalazi se ulazna elektroda, tzv. *uvod*, s oznakom S (prema engl. *Source*), a na drugom izlazna elektroda, tzv. *odvod*, s oznakom D (prema engl. *Drain*). U sredini je sa gornje i donje strane udifundiran sloj suprotnog tipa vodljivosti nego što ga ima kanal, a na njega su postavljene upravljačke elektrode, tzv. *gejt* ili *zasun*, s oznakom G (prema engl. *gate*). PN-spoj je sa gornje i donje strane nepropusno polariziran, pa se između P-sloja i N-sloja stvara barijera (prelazna zona) koja se, slično kao kod kapacitivne diode, u ovisnosti o narinutom naponu širi ili sužava. Vodljivost poluvodiča upravljačke elektrode G mnogo je veća od vodljivosti kanala, pa se stoga barijera širi gotovo isključivo u kanal. Struja kroz kanal ovisna je o naponu U_{DS} između odvoda i uvoda i o širini kanala, a ova opet ovisi o širini nepropusno polarizirane barijere. Širina te barijere je proporcionalna drugom korijenju potencijalne razlike između zasuna i pojedinih tačaka kanala. Budući da je ta razlika najmanja između zasuna G i uvoda S, i budući da ona postepeno raste prema odvodu D, to se i barijera postepeno širi od uvoda prema odvodu, a vodljivi kanal se sužava. Na širinu kanala djeluju, dakle, i zaporni napon U_{GS} i napon odvoda U_{DS} .

Struja odvoda I_D , koja teče kanalom, uz konstantni napon zasuna U_{GS} , pri povećanju napona odvoda U_{DS} u početku raste, ali kasnije dolazi do njezina zasićenja (sl. 86 c). Mada se s pove-

ćanjem napona U_{DS} i kanal sužava, ipak je djelovanje napona na nosioce naboja veće od utjecaja sužavanja kanala. Međutim, kad se barijere jednom dodirnu, utjecaj se napona U_{DS} smanjuje, a prevladava utjecaj suženja barijere, te struja I_D pri daljem povišenju napona U_{DS} ostaje skoro konstantna. Područje prije dodira zove se *triodno područje* rada, a područje poslije dodira barijera *područje zasićenja* ili dodira. Za male napone u triodnom području (karakteristika oko ishodišta) ovisnost struje I_D o naponu U_{DS} gotovo je linearna. U području zasićenja napon odvoda U_{DS} ne utječe više na struju, ali porast napona U_{GS} na upravljačkoj elektrodi, tj. u zasunu G, doprinosi produženju suženog dijela kanala prema elektrodi uvoda, pa time doprinosi također povećanju otpora kanala i smanjenju struje. To se vidi iz prenosne karakteristike sa sl. 86 c (lijevo), koja prikazuje ovisnost struje odvoda I_D o naponu upravljačke elektrode U_{GS} uz konstantan napon U_{DS} pri kome tranzistor radi u području zasićenja. Napon odvoda U_{DS} pri kome uz napon zasuna $U_{GS} = 0$ dolazi do dodira barijera zove se napon dodira U_p , a struja koja teče u tom slučaju ($U_{DS} = U_p$) struja je dodira I_p .

Poznavajući raspodjelu primjesa u kanalu, može se i analitički izraziti ovisnost struje I_D o naponima U_{DS} i U_{GS} u triodnom području. Ovisnost struje I_D o naponu U_{GS} u području zasićenja je praktički neovisna o raspodjeli primjesa i vrlo dobro se može aproksimirati kvadratnim zakonom

$$I_D = I_p \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_p} \right)^2. \quad (51)$$

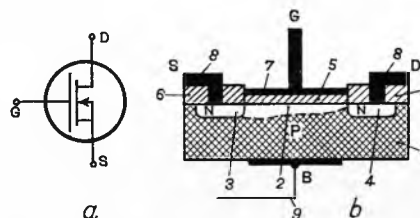
Prenosna karakteristika je parabola iz koje se može odrediti napon U_p . Tangenta na parabolu (51) u tački $U_{GS} = 0$ siječe os apscisa u tački s apscisom $U_p/2$.

Temperaturna osjetljivost struje I_D potječe od temperaturne ovisnosti širine barijere i temperaturne ovisnosti pokretljivosti nosilaca u kanalu. Širina barijere se s povišenjem temperature smanjuje, uslijed čega se kanal proširuje i struja povećava, a pokretljivost se s povišenjem temperature smanjuje i uzrokuje smanjenje struje. Ako se ta dva djelovanja poništavaju, dobiva se tranzistor s malom osjetljivošću prema temperaturi.

Šum unipolarnih tranzistora također je malen, te se oni upotrebljavaju u mjernim uređajima. Pri prekomjernom povećavanju napona U_{DS} dolazi do proboja između odvoda i zasuna, što dovodi do razaranja tranzistora (v. crtkani dio karakteristika na sl. 86 c).

Spojni unipolarni tranzistor može biti i fotoosjetljiv. Njegova je osjetljivost velika jer se zbog velikog ulaznog otpora već pri malim fotostrujama na upravljačkoj elektrodi javlja znatan napon.

Unipolarni tranzistor s izoliranim zasunom ili *mosfet* (engl. MOSFET — Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor). Simbol tog tranzistora prikazuje sl. 87 a, a njegovu načelnu konstrukciju sl. 87 b. Na podlozi I_{tzv} supstratu, od slabo vodljivog silicijumskog poluvodiča tipa P napravljene su difuzijom dvije jako dopirane zone tipa N, 3 i 4, koje služe kao uvod S i odvod D.



Sl. 87. Unipolarni tranzistor s izoliranim zasunom. a) Simbol, b) konstrukcija, shematski prikaz: 1 podloga, 2 kanal, 3 uvod, 4 odvod, 5 tanki sloj oksida, 6 debeli sloj oksida, 7 metalna elektroda zasuna, 8 priključni kontakti uvoda i odvoda, 9 elektroda osnove

Između njih nanijet je na supstrat tanak sloj silicijum-dioksida 5, koji je dobar izolator. Na njega je naparen tanak metalni sloj 7 koji služi kao elektroda zasuna G, a koji sa spomenutim dielektrikom i vodljivim silicijumskim slojem 2 čini kondenzator s upravljivim kapacitetom. Uz gornju plohu supstrata između priključaka S i D postoji N-vodljiv kanal 2, koji se dobiva određenim tehnološkim postupkom ili efektom polja. Napon zasuna

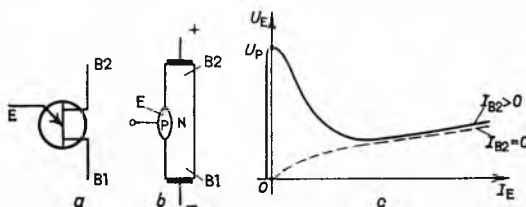
djeluje na vodljivost tog kanala i na taj način upravlja strujom koja teče kroz tranzistor.

Ovaj tip tranzistora može raditi i s pozitivnim i s negativnim naponima na zasunu, jer struja počinje teći kroz njega već pod određenim negativnim naponom U_{GS} . Pozitivni naponi na upravljačkoj elektrodi G povećavaju broj elektrona u kanalu i struju kroz njega, tj. tranzistor u tom slučaju radi u »obogaćenom modu«; negativni naponi, pak, smanjuju broj elektrona, umanjuju struju i tranzistor radi u »siromašenom modu«. Ovakav tip tranzistora je N-kanalni, jer vodljivosti kroz kanal doprinose elektroni.

Tranzistor može biti izveden i kao P-kanalni ako su na N-vodljivoj podlozi nanoseni uvod i odvod tipa P.

Statičke karakteristike ovog tranzistora u biti su iste kao i karakteristike unipolarnog tranzistora s PN-spojem, jer i ovdje postoji napon dodira, pri kojem se kanal vrlo sužava. Ulazni otpor ovih tranzistora vrlo je velik, a tehnološki su vrlo jednostavni i naročito pogodni za primjenu u integriranim krugovima.

Tranzistor s jednim PN-spojem ili dioda s dvije baze (sl. 88 a, b) sastoji se od pločice N-vodljivog silicijuma koja na oba svoja kraja ima elektrode zvane baza B1 i baza B2. Oko sredine pločice nalazi se P-vodljiv sloj koji predstavlja emiter, a kolektor nema. Izvor struje priključen je između baze B1 i baze B2 i to s plus-polom na B2. Zbog pada napona duž pločice kojoj otpor iznosi, dok nema napona na emiteru, više hiljada oma, predio pločice uz emiter pozitivniji je od baze B1. Za napone emitera U_E manje od napona koji vlada na dijelu pločice tik uz emiter, PN-spoj je reverzno polariziran i emitera struja je samo reverzna struja PN-spoja. Kad napon emitera dosegne vrijednost U_p (sl. 88 c) PN-spoj postaje propusno polariziran. Tranzistor je tako građen da šupljine ubačene iz emitera u bazu B1 uslijed velike injekcije znatno smanjuju otpor pločice u tom predjelu (na nekoliko desetaka oma), pa se pad napona uslijed struje između baze B2 i baze B1 smanjuje. Sada je potreban manji napon za propusnu polarizaciju PN-spoja, i stoga pri porastu struje napon pada.



Sl. 88. Tranzistor s jednim PN-spojem. a) Simbol, b) shematski prikaz, c) ulazna karakteristika

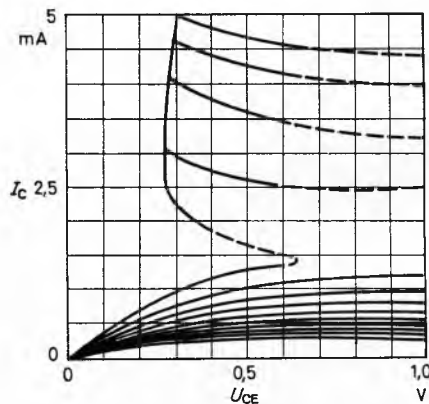
Tako se dobiva »negativan otpor«, kako se to vidi iz karakteristike elementa na sl. 88 c. Uslijed »negativnog otpora«, taj tranzistor može služiti kao jednostavan generator impulsa u niskofrekventnim sklopovima, npr. za okidanje tiristora.

Poluvodičke sklopne naprave služe kao sklopke snage i imaju danas u elektronici jake struje znatnu ulogu (v. *Ispravljači*). U ovu grupu elemenata idu: sklopni tranzistori, upravljivi silicijumski ispravljači, tiristorske tetrode, trijak i još neki drugi elementi.

Sklopni tranzistori imaju sličnu karakteristiku kao tiratroni (v. str. 471), ali se mogu, za razliku od njih, upotrijebiti za pojačanje, kao obični tranzistori, ili kao sklopke. Pri malim strujama kolektora taj se tranzistor ponaša kao obični tranzistori. Pri povećanju struje kolektora, i to pri jednoj kritičnoj vrijednosti, ta struja naglo poraste, a napon se između kolektora i emitera U_{CE} smanjuje na malu vrijednost. Proces prebacivanja iz područja male kolektorske struje u područje velike struje pri malom naponu kumulativan je i označen isprekidanim linijama na karakteristici $I_C = f(U_{CE})$ prikazanoj na sl. 89. Pojava je analogna paljenju tiratrona. Nakon proboja, smanjenje struje baze I_B nema više nikakva utjecaja na kolektorsku struju I_C . Međutim, za razliku od tiratrona, ako se emiserski sloj inverzno polarizira, može se sklopni tranzistor prebaciti iz vodljivog natrag u nevodljivo stanje. S obzirom na to da je sloj baze osjetljiv, takvi se sklopni tranzistori grade samo za manje snage.

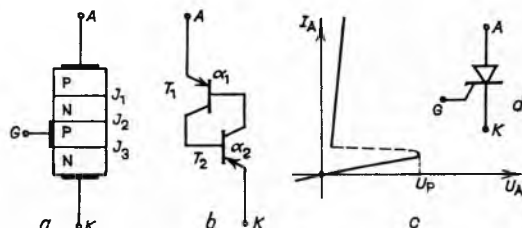
Četveroslojne sklopne diode strukture PNPN imaju tri PN-spoja od kojih su dva, dok vlada na anodi plus-napon, vodljiva,

a jedan je nevodljiv. Pri manjem naponu srednji PN-spoj, na kome leži gotovo cijeli priključeni napon, zatvara. Povećuje li se postepeno anodni napon, pri jednoj određenoj njegovoj vrijednosti nastupa proboj tog PN-sloja, jer visokim naponom ubrzani elektroni izazivaju lavinsku multiplikaciju na toj barijeri, pa se time uspostavlja velika struja. U suprotnom se smjeru to ne dešava. Snizuje li se takvoj diodi postepeno struja, ona pri određenoj struji (struji držanja) postaje opet nevodljiva. Diodne četveroslojne sklopke uklapaju se s pomoću impulsa napona višeg nego što je nazivni napon sistema koji se uklapa. One se danas rijetko primjenjuju.



Sl. 89. Izlazna karakteristika sklopnog tranzistora $I_C = f(U_{CE})$ uz različite parametre I_B

Upravljivi silicijumski ispravljači za koje se ponekad primjenjuje kratica SCR (engl. Silicon Controlled Rectifier) nazivaju se danas najčešće *tiristorima*. Njihovo se djelovanje zasniva na principu naprijed opisane četveroslojne diode strukture PNPN; oni imaju također strukturu PNPN, s time da su dva unutarnja sloja nešto slabije dopirana. Na P-kraju strukture nalazi se anoda A, na N-kraju katoda K, a upravljačka je elektroda G priključena na srednji sloj (sl. 90 a). Tiristor ima tri PN-spoja: J_1 , J_2 i J_3 . Uz pozitivne napone na anodi, spojevi J_1 i J_2 propusno su polarizirani, a spoj je J_2 polariziran nepropusno. Na njemu, međutim, leži gotovo sav izvana priključeni napon. Kad krugom upravljačke elektrode protekne odgovarajući strujni impuls, sloj J_2 postaje propustan, te se uspostavlja struja koja je ograničena otporom vanjskog kruga. Ujedno i napon između anode i katode spadne na mali iznos.



Sl. 90. Upravljivi silicijumski ispravljač (tiristor). a) Shematski prikaz, b) prikaz četveroslojne strukture pomoću dva tranzistora, c) tipična karakteristika paljenja, d) simbol

Način rada tiristora može se objasniti i prikazivanjem četveroslojne strukture pomoću dva tranzistora (sl. 90 b), od kojih je jedan PNP a drugi NPN. Baza tranzistora T_1 ujedno je i kolektor tranzistora T_2 i obrnuto. Kad tiristor ne vodi, oba tranzistora su u svom aktivnom području. Poveća li se bilo iz kojeg razloga bazna struja tranzistora T_1 , povećava se i njegova kolektorska struja, a to znači i bazna struja tranzistora T_2 . Zbog toga se povećava i njegova kolektorska struja, što opet znači povećanje bazne struje tranzistora T_1 . Proces može postati kumulativan i dovodi do naglog povećanja struje kroz tiristor. Pomoću struja kroz tranzistore T_1 i T_2 može se prema izrazu (47) izraziti struja tiristora jednadžbom

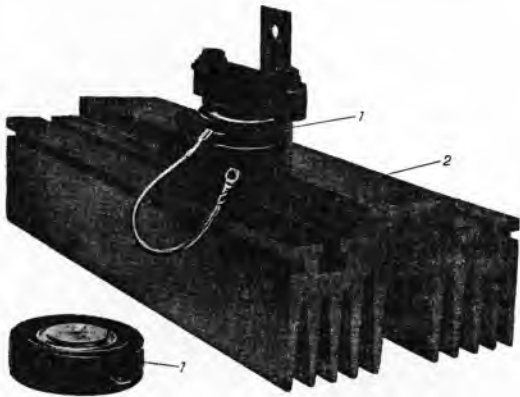
$$I_A = \frac{\alpha_1 I_{B1} + I_{KB1} + I_{KB2}}{1 - \alpha_1 - \alpha_2} \quad (52)$$

u kojoj su α_1 i α_2 strujna pojačanja tranzistora T_1 i T_2 . Iz tog se izraza vidi da će do kumulativnog procesa doći kad je $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, a taj se uvjet postiže povećanjem struje I_{B1} . Kod silicijumskih upravljivih ispravljača se to postiže strujom kroz upravljačku elektrodu G.

Tipična karakteristika paljenja tiristora prikazana je na sl. 90 c, a njegov simbol na sl. 90 d. Izgled tiristora u obliku kapsule

s rashladnim tijelom prikazuje sl. 91. Kad se uslijed struje upravljačke elektrode jednom uspostavi struja anode, ona se ne može više prekinuti djelovanjem na upravljačku elektrodu, već samo smanjenjem anodnog napona.

Ovi su tiristori vrlo pogodni za upravljanje jakim strujama i do ~ 1000 A, jer su njihove dimenzije male, jer su odmah spremni za pogon, jer im je život dug, jer je struja upravljanja ~ 100 puta manja od upravljane struje i jer se u stanju nevođenja mogu naponski opteretiti i sa preko 1000 V. Može se očekivati da će tiristori zamijeniti tiratrone i živine ventile manjih snaga.

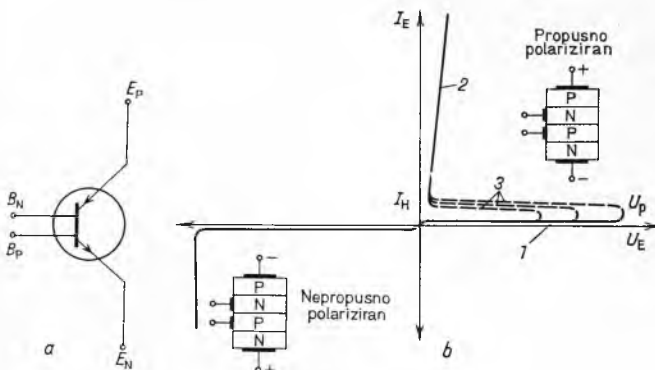


Sl. 91. Izgled upravljivog silicijumskog ispravljača (tiristora) i pripadnog rashladnog tijela. 1 Tiristor u obliku kapsule, 2 rashladno tijelo

Zaporni tiristor (ili GTO od engl. Gate Turn Off — zapirane upravljačkom elektrodom) građen je tako da negativan impuls na upravljačkoj elektrodi izvlači iz baze tranzistora T_2 toliko nosilaca da prestaje teći anodna struja.

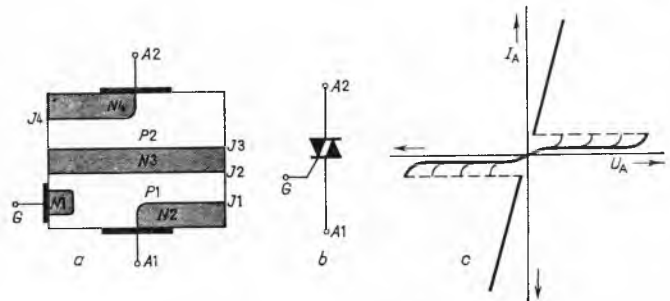
Svjetlom upravljivi tiristor (ili LASCR od engleskog Light Activated SCR, tj. svjetlom aktivirani SCR) aktivira se snopom svjetla usmjerenim na četveroslojnu diodu. Pod utjecajem svjetla generiraju se parovi elektronâ i šupljina, uslijed čega dolazi do prebacivanja u stanje vođenja i uspostavljanje struje.

Tiristorske tetrode su silicijumske sklopke kojima se konstrukcija također bazira na četveroslojnoj diodi, s time što imaju dvije dodatne elektrode i to na oba unutarnja sloja po jednu. S pomoću tih dviju dodatnih elektroda može se uz malu struju upravljanja tetroda staviti u stanje vođenja, a nakon toga može se struja opet isključiti. Simbol, načelnu konstrukciju i karakteristiku takve tetrode manje snage prikazuje sl. 92 a i b.



Sl. 92. Tiristorska tetroda. a Simbol, b karakteristika paljenja; U_p upravljački napon paljenja, 1 područje velikog otpora, 2 područje malog otpora, 3 područje negativnog naponskog koeficijenta otpora

Trijak (engl. Triac) je poluvodički upravljački element koji vodi struju u oba smjera i služi za upravljanje s oba poluvala izmjenične struje. On se sastoji u principu od dva antiparalelno spojena tiristora sa zajedničkom upravljačkom elektrodom, s time što je sve izvedeno u jednom sistemu. Njegova je konstrukcija shematski prikazana na sl. 93 a, a simbol i karakteristika vide se na sl. 93 b, c.

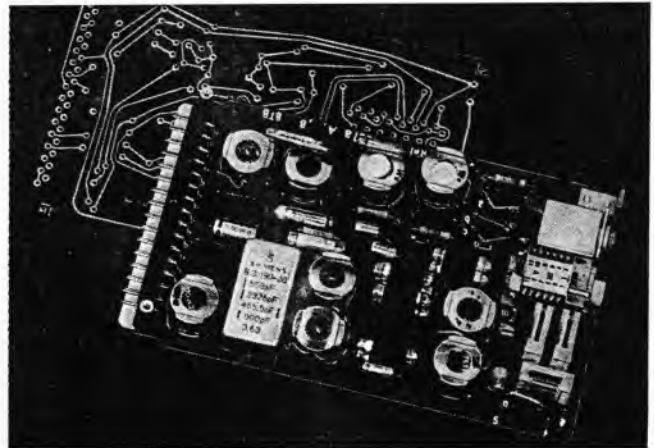


Sl. 93. Trijak. a Shematski prikaz konstrukcije, b simbol, c karakteristika paljenja $I_A = f(U_A)$ uz različite parametre U_G

Integrirani sklopovi

Integrirani sklopovi predstavljaju skup na istoj podlozi izrađenih spojnih vodova i sastavnih dijelova koji su neposredno jedni s drugima spojeni (»integrirani«) u jedan ili više sklopova. U tim su sklopovima na istoj podlozi po istom postupku izrađeni tranzistori, otpornici, kondenzatori, itd. Tehnici izrade takvih sklopova prethodili su tzv. štampani krugovi i razvitak planarne tehnike. (Za tu potonju v. str. 482.)

U **štampanim krugovima**, koji se i danas često primjenjuju, učvršćeni su sastavni dijelovi (npr. otpornici, tranzistori), koji su obično izrađeni u minijaturnoj izvedbi, s jedne strane ploče od izolacionog materijala (keramike, izolacionog papira). Njihove su žice za priključak provučene kroz rupice na ploči na drugu stranu i tamo zalemljene na srebrne spojne pruge koje su naparivanjem, jetkanjem ili nekim drugim postupkom izrađene na drugoj strani ploče. One spajaju dijelove u sklop, a da se pri tome ne križaju (sl. 94).



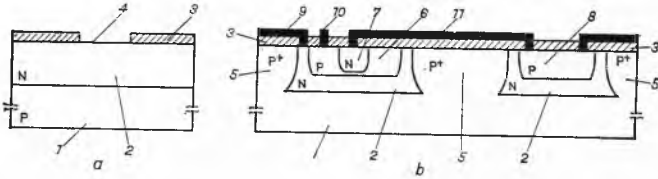
Sl. 94. Štampani krugovi. Pogled odostrag na spojne trake i odosprijed na montirane elemente

S obzirom na međusobni razmještaj sastavnih dijelova integrirani su sklopovi monolitni ili hibridni. Sve komponente **monolitnih integriranih sklopova** izrađene su na jednom komadu kristala, najčešće silicijuma, a pojedine grupe komponenata **hibridnih sklopova** izrađene su na posebnim dijelovima kristala, ali su pričvršćene na podlogu od izolatora. Komponente su između pojedinih grupa povezane vrlo tankim žicama, a sve je to zatvoreno u jedno zajedničko kućište.

Tehnički postupci za izradu integriranih sklopova zasnivaju se na principu izrade poluvodičkih elemenata ili na principu izrade tzv. tankog ili debelog filma.

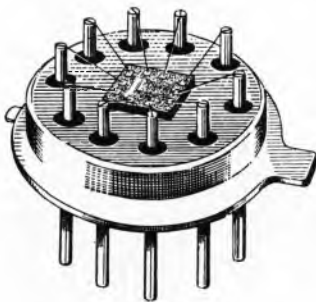
Poluvodički integrirani sklopovi izrađuju se najčešće u epitaksijalno - planarnoj tehnici s dvostrukom difuzijom, slično kao i planarni tranzistori. Na podlozi 1 od P-vodljivog silicijuma (sl. 95 a) debljine ~ 150 μm i specifičnog otpora ~ 10 Ωcm nanosi se odgovarajućim procesom epitaksijalni sloj N-vodljivog silicijuma 2 debljine ~ 25 μm i specifičnog otpora ~ 1 Ωcm . Površina epitaksijalnog sloja zaštićena je slojem silicijum-dioksida 3. Ovaj se sloj na određenim mjestima 4 posebnim fotolitografskim

postupkom i jetkanjem odstrani. Na taj se način dobiva maska, koja štiti silicijum od prodiranja primjesa, te one prilikom difuzije prodiru samo na onim mjestima gdje je oksid odstranjen. Kod



Sl. 95. Dio poluvodičkog monolitnog integriranog sklopa. a Početna faza, b prikaz tranzistora i otpornika; 1 provodljiva podloga, 2 N-vodljivi epitaksijalni spoj, 3 zaštitni sloj oksida, 4 otvor u oksidnom sloju, 5 P+-područje dobiveno izolacionom difuzijom, 6 baza tranzistora, 7 emiter tranzistora, 8 sloj dobiven baznom difuzijom a služi kao otpornik, 9 kolektorski kontakt, 10 bazni kontakt, 11 emitterski kontakt i spoj s otpornikom

monolitnih se sklopova najprije dubokom difuzijom primjesa tipa P (5), koje prodiru kroz epitaksijalni sloj sve do podloge, stvaraju odvojena područja 2 epitaksijalnog sloja (sl. 95 b). PN-barijera između epitaksijalnog sloja i podloge uvijek se polarizira nepropusno, dovodeći na podlogu napon negativniji od bilo koje tačke sklopa. Na taj su način dijelovi epitaksijalnog sloja jedni od drugih električno dobro izolirani. Difuzijom, koja ne prodire kroz epitaksijalni sloj, dobiva se P-vodljivi sloj 6, koji će služiti kao baza bipolarnog tranzistora, a epitaksijalni sloj 2 služiti će kao kolektor. Difuzijom donora u bazni sloj dobiva se dobro vodljivo područje tipa N (7), koje će činiti emiter. Dubine bazne i emitterske difuzije podese se tako da se dobije dovoljno uska baza. Odstranjivanjem oksida na određenim mjestima površine i napanivanjem tankog sloja metala dobivaju se kontakti 9, 10 i međuspojevi 11 s pojedinim dijelovima tako dobivenog tranzistora. Na taj se način mogu istovremeno proizvoditi sve aktivne i pasivne komponente sklopa. Kao otpornik može služiti sloj 8 dobiven baznom difuzijom, kao što je to prikazano na sl. 95 b. Kao dioda može se upotrijebiti PN-barijera nastala baznom ili emitterskom difuzijom.

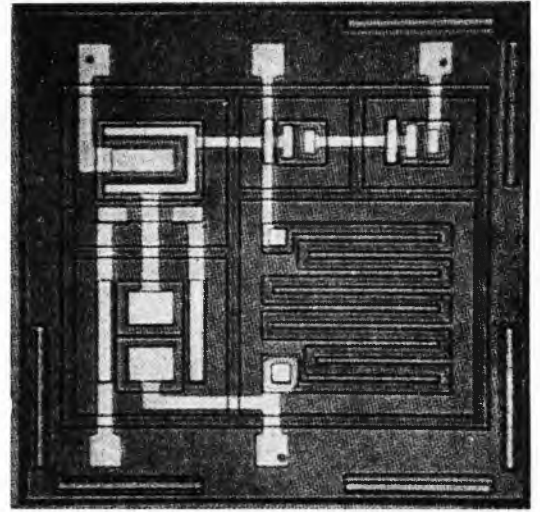


Sl. 96. Integrirani sklop montiran u kućište

se na jednoj pločici silicijuma ovim procesima dobiva velik broj identičnih integriranih sklopova. Pločica se dijamantnim šiljkom reže na «kockice» od kojih svaka sadrži po jedan sklop, koji se onda učvrsti na kućište i tankim žicama poveže sa spojnim nožicama (sl. 96). Kućište se u atmosferi inertnog plina hermetički zatvori odgovarajućom kapicom. Izgled takvog integriranog kruga prikazuje sl. 97.

Tehnološki postupci izrade integriranih sklopova mogu biti vrlo različiti, ali svi se uglavnom osnivaju na fotokemijskim metodama. Nakon što se sklop konstruira u velikom mjerilu, izrade se prema tom nacrtu vrlo precizno s pomoću koordinatografa maske za pojedine faze proizvodnje (sl. 98) 100...1000 puta uvećano u odnosu prema konačnoj veličini. Te maske, kojih ima za svaki sklop 5...7, snime se, umnože i slažu u grupe (jer se odjednom izrađuje više sklopova). Kroz tako dobivene fotomaske osvijetli se na svjetlost osjetljivi foto-lak kojim je prevučen gornji sloj sklopova (npr. SiO_2). Na osvijetljenim mjestima lak se skida, zaštitni sloj izjetka i tako se dobije ploha koju treba dalje obraditi.

Integrirani sklopovi s tankim filmom proizvode se napanivanjem tankog sloja (nekoliko mikrometara) metala (aluminijuma, zlata, bakra itd.) i izolatora (oksida ili nitrida). Sloj se napari preko



Sl. 97. Jako povećana slika malog monolitnog integriranog sklopa

cijele površine, a zatim se jetkanjem odstrani s određenih mjesta. Od neodstranjenih dijelova načine se otpornici i kondenzatori. Takvi su sklopovi uvijek hibridni, jer se aktivne komponente zasad još ne mogu dobiti postupkom tankog filma, već se moraju naknadno dodati.

Integrirani sklopovi s debelim filmom (debljine $\sim 25 \mu\text{m}$) izrađuju se nanošenjem posebne paste kroz masku na keramičku podlogu. Sušenjem i zagrijavanjem na temperaturi od $\sim 1000^\circ\text{C}$ dobivaju se dijelovi koji predstavljaju dobre vodiče, otpornike ili izolatore, ovisno o vrsti paste. Aktivni sastavni dijelovi i ovdje se izrađuju posebno i žicama spajaju, tako da su i ovi sklopovi hibridni.

Integrirani sklopovi proizvode se i za vrlo visoke frekvencije od 1 do 15 GHz. To su uglavnom hibridni sklopovi u kojima su pasivne komponente nanosene na podlogu od naročito kvalitetne keramike u obliku tankog ili debelog filma, a mogu biti i s raspodijeljenim i s koncentriranim parametrima.



Sl. 98. Izrada fotomaske

Češće primjenjivani integrirani sklopovi jesu linearni integrirani sklopovi (pojačala različitih vrsta, najčešće operaciona diferencijalna pojačala) i nelinearni sklopovi (digitalni, logički i impulsni sklopovi). V. *Elektronika, sklopovi*. D. Fišer

Tehnološki postupci izrade hibridnih integriranih sklopova. Hibridni integrirani sklopovi koji se danas upotrebljavaju u mikroelektronici sastoje se od podloge, na kojoj su u slojnoj tehnici izrađene vezne staze i neki pasivni elementi, i od izvana dodatih i na tu podlogu priključenih i učvršćenih aktivnih i pasivnih elemenata i monolitnih krugova i sklopova.

Podloge se izrađuju prema tehnici tankog ili debelog filma, a dodati dijelovi i monolitni sklopovi po jednoj od tehnologija koje se primjenjuju pri izradi poluvodičkih elemenata. Odnos ovih tehnologija prema tiskanim (štampanim) krugovima prikazan

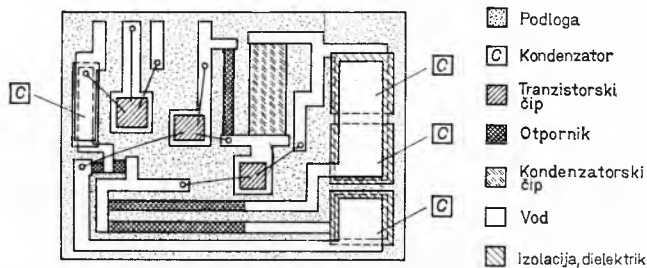


Sl. 99. Tehnologije primijenjene u modernoj elektronici

je na sl. 99. Ponekad se na podlogu montiraju pasivne i aktivne komponente s kućištem u izvedbi u kojoj se obično ugrađuju na ploče s tiskanim krugovima. (Zbog miješanja i kombiniranja sastavnih dijelova izrađenih prema različitim tehnologijama takvi se sklopovi i zovu hibridni ili kratko *hibridi*.) Hibridni se sklopovi izrađuju zbog toga što se primjenom samo jedne od navedenih tehnologija ne mogu na istoj podlozi izraditi svi potrebni elementi, a također radi boljeg iskorišćenja tehničkih i ekonomskih prednosti što ih pružaju pojedine tehnologije.

Hibridi danas sve više zamjenjuju tiskane krugove, pa im stoga pripada posebno mjesto u modernoj elektronici. Oni se dijele na dvije grupe koje se tehnološki bitno razlikuju, a poznate su pod nazivom *tehnika debelog filma* i *tehnika tankog filma*.

Tehnika debelog filma. Hibridni sklop izrađen u tehnici debelog filma shematski je prikazan na sl. 100. Izrada takvog hibridnog sklopa počinje izradom i proračunom električne sheme.



Sl. 100. Shematski prikaz hibridnog integriranog sklopa izrađenog tehnikom debelog filma

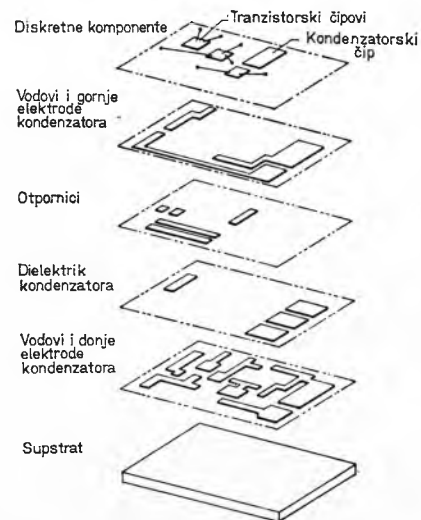
Ona se zatim transponira u niz tlocrta koji u povećanom mjerilu prikazuju vodljive staze, preklopne izolacije i otpornike. Oblik, veličina i međusobni raspored pojedinih likova koji prikazuju otpornike, a gdje kada i kondenzatore, dobiju se primjenom posebnih pravila i proračuna. Nakon toga se crtež fotografira i slika likova smanji na mjerilo 1 : 1, tj. na prirodnu veličinu budućih hibridnih sklopova. Tako dobiveni filmovi služe za direktnu izradu fotošablona (fotomaski) na sitima uređaja za sitotisk.

Kao podloga, tzv. supstrat, služi u tehnici debelog filma keramička pločica, npr. od aluminijum-oksida (Al_2O_3), na koju se sitotiskom pomoću fotošablona uzastopno nanose (tiskaju) različitim posebnim pastama željeni likovi koji služe kao vod-

ljive staze, elektrode kondenzatora, dielektrici kondenzatora i kao otpornici (sl. 101). Ove su paste mješavine staklenog praha i organskih veziva s metalima i izolacijskim materijalima, već prema funkciji namijenjenoj likovima koji se njima tiskaju. Nakon tiskanja supstrati se s otisnutim likovima suše a zatim peku u višezonskim tunnelskim pećima na temperaturama od 200 do 1100°C, ovisno o sastavu paste. U toku termičke obrade organska veziva se ispare a preostali se materijali kemijski vežu na keramički supstrat. Tako dobiveni tanki slojevi likova, tzv. filmovi, debeli su 10...50 µm. Zatim se supstrat s natisnutim likovima vizuelno kontrolira pomoću povećala i električki ispituje specijalnim elektroničkim mjernim instrumentima, kojima prema određenom programu upravljaju elektronička računala. U toku tog postupka vrši se i točno justiranje (tzv. trimovanje) otpornika na zadanu vrijednost otpora. To se radi bilo uz izravno mjerenje otpora pojedinih otpornika, bilo tako da se na sklopu kao cjelini, uz određene ulazne veličine, mjere izlazne karakteristike i justiranjem otpornika postiže da te karakteristike poprime zadane vrijednosti. Justiranje po ovom drugom postupku (tzv. dinamičko justiranje) ima vrlo značajne ekonomske prednosti. Uređaji za justiranje (tzv. trimeri) starije konstrukcije primjenjuju za justiranje otpornika mlaz abraziva kojim se izreže dio sloja; suvremeni trimerski uređaji rade laserskom zrakom koja pri justiranju izreže dio otpornika i na taj način dovodi njegov otpor u okvire traženih tolerancija. Laserskim trimerima upravljanim elektroničkim računalima postiže se velika brzina rada (do 8000 justiranja na sat) i točnost do ispod 0,1% vrijednosti otpora otpornika.

Ugradnja pločica s elementima ili sklopovima. Poluvodički sastavni dijelovi: diode, tranzistori, kondenzatori i različni drugi elementi, a isto tako i neki monolitni sklopovi, izrađuju se odvojeno po tehnologiji za proizvodnju poluvodičkih dijelova i nakon sječenja u male pločice, tzv. čipove (engl. *chip*, iver, znači ovdje minijturni sastavni dio) ugrađuju se na podlogu izrađenu u tehnici debelog filma. U hibride se ugrađuju mali, srednji i veliki monolitni sklopovi. Čipovi se moraju prije ugradnje električki ispitati, a neposredno prije same ugradnje vizualno se ispituju i onda očiste.

Ugradnja čipova u likove na supstratu tehnički je najsloženija faza u proizvodnji hibrida jer zahtijeva vrlo precizan rad i precizno povezivanje (tzv. bondiranje, od engl. *bonding*, čvrsto spojiti) pojedinih elektrodâ čipova s veznim površinama likova na supstratu.



Sl. 101. Razloženi prikaz po proizvodnim fazama tipičnog jednostavnog hibridnog mikroelektroničkog sklopa sa sl. 100 izrađenog u tehnici debelog filma

Čipovi se s likovima spajaju pomoću tankih zlatnih ili aluminijumskih žica koje se ili zavaruju na odgovarajuće elektrode analogno kao pri izradi tranzistora ili (što je brži, pa prema tome i jeftiniji način zavarivanja) tzv. tehnikom »beam lead« i »flip chip«, pri kojoj se svi izvodi čipa odjednom zavare na odgovarajuće mjesto lika na supstratu pomoću tzv. termokompresije.

Ovakvo spajanje traži posebnu konstrukciju i izvedbu poluvodičkog čipa. Stoga poluvodička tehnologija slijedi zahtjeve hibridne tehnologije, a i sam njen razvoj to spontano pospešuje.

Ispitivanje hibrida. Nakon završene ugradnje svih dijelova na supstrat hibrid je formiran, pa se pristupa završnom ispitivanju električnih karakteristika, fizičkog izgleda i mehaničkih svojstava sklopa. Električne se karakteristike ispituju pomoću automatskih mjernih uređaja kako je već opisano. Ispitne stanice obično su fleksibilne u pogledu sastavljanja programa, tako da mogu ispitivati različite parametre pojedinih proizvoda. Ispituju se obično istosmjerne struje i naponi, zatim frekvencije i izlazne karakteristike uz određene pobude na ulazu. Uređaj za ispitivanje priključuje se na hibrid pomoću glave s igličastim elektrodama koje se prislone na određene točke hibrida. Pored optičke indikacije obično se vrši i registracija rezultata na bušenoj traci radi analize i dokumentacije.

Popravak neispravnih sklopova. Zbog složenosti izrade i minijature izvedbe hibridnih sklopova, greške su česta pojava. Stoga je u automatskim linijama za proizvodnju hibridnih sklopova već proizvodnim procesom predviđeno popravljivanje neispravnih komada, kako bi se škart što više smanjio. To se dosta lako postiže s obzirom na to da se najčešće radi o slabom varu, puknutom čipu ili nekoj drugoj mehaničkoj grešci, koja se brzo uočava i može popraviti prije zatvaranja hibrida. Tako se postiže znatno povećanje produktivnosti uz vrlo malo dodatnog rada.

Zaštita i zatvaranje u kućište (pakiranje). Hibridi se nakon dovršenja premažu zaštitnim prozirnim lakom i zatim zatvore u plastično kućište iz kojeg vire samo izvodi konstruktivno prilagođeni za određenu ugradnju. Hibridi još nemaju standardne izvedbe pakiranja kao monolitni integrirani krugovi i sklopovi, iako se već primjećuje tendencija prema standardizaciji pakiranja. Paste iz kojih se izrađuju vodljive staze i otpornici nisu nakon termičke obrade u znatnijoj mjeri osjetljive prema vlazi i prašini, tako da se neki hibridi i ne premazuju zaštitnim lakom, već se samo zatvore u plastično zaštitno kućište.

Značajno je također napomenuti da zrak u prostorijama gdje se proizvodi debeli film ne mora biti veoma velike čistoće, ali u prostorijama gdje se vrši tiskanje pasti na supstrate sitotiskom potrebno je održavati relativnu vlagu u zraku na $\sim 45\%$ i temperaturu na $\sim 22^\circ\text{C}$.

Tehnika tankog filma. Podloga s krugovima, koje sačinjavaju vodljive staze i neki pasivni elementi, proizvodi se tehnološkim postupcima koji se susreću i u nekim fazama proizvodnje poluvodičkih elemenata. Naime, na supstrat od stakla ili keramike nanose se slojevi (filmovi) metala (zlata, aluminijuma i dr.), izolacijskih i otporničkih materijala naporivanjem ili štrcanjem u vakuumu. Ti se postupci provode u komorama u kojima se održava velika čistoća, te je zbog toga proizvodnja sklopova ovim postupcima znatno teža nego tehnikom debelog filma a i teže ju je automatizirati. Materijal koji se naporuje zagrijava se na visoku temperaturu i zatim kondenzira na supstratu. Pri štrcanju se materijal nanosi uz pomoć visokog napona. Likovi na supstratu izrađuju se uz upotrebu metalne maske koja je prislonjena uz supstrat za vrijeme naporivanja, postupkom fotomaskiranja i selektivnog jetkanja ili, pak, laserskim snopom kojim se izrežu likovi na supstratu na koji je po čitavoj površini naparen npr. zlatni sloj. Premda se ovim postupcima može postići znatno veća točnost u izradi otpornika određene vrijednosti otpora nego tehnikom debelog filma, i ovdje se konačna vrijednost otpora postiže uz pomoć justiranja. Debljine slojeva (filmova) dobivenih ovom tehnikom kreću se od 0,5 do 5 μm , pa otpornici u tehnici tankog filma imaju manju sposobnost disipacije i smiju se stoga samo neznatno opteretiti.

S tako izrađenom podlogom kombiniraju i spajaju se čipovi aktivnih i drugih elemenata, slično kao u tehnici debelog filma, i time stvaraju hibridi. Sklopovi izrađeni tehnikom tankog filma skuplji su od sklopova izrađenih tehnikom debelog filma, ali za određenu primjenu imaju prednost. Tako izgleda da će ova tehnologija postati dominantna u mikrovalnoj tehnici, tj. u radarskim i radiorelejnim uređajima, gdje je pored velike pouzdanosti važno i smanjenje dimenzija uređaja, naročito npr. u satelitskoj i avionskoj elektronici.

Uspoređenje nekih svojstava hibridnih sklopova izrađenih tehnikom tankog i debelog filma dato je u tabl. 5.

Tablica 5
SASTAV I VAŽNIJA SVOJSTVA HIBRIDNIH SKLOPOVA IZRAĐENIH PO TEHNOLOGIJI TANKOG I DEBELOG FILMA

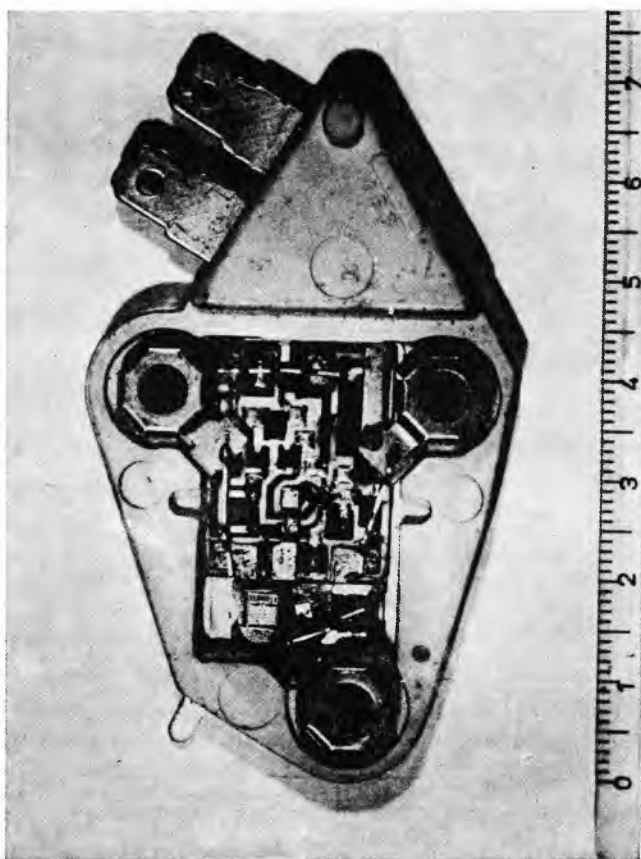
Element ili svojstvo sklopa	Tanki film	Debeli film
Supstrat	staklo	keramika
Vodljive staze	zlato	pasta vodljivog materijala
Otpornici	NiCr ili Ta	pasta od materijala za otpornike sitotisk
Proces nanošenja	naparivanje ili prskanje	
Opseg otpora otpornika	20 Ω ...100 k Ω	1 Ω ...5 M Ω
Tolerancija	$\pm 20\%$... $\pm 0,5\%$	$\pm 20\%$... $\pm 2\%$
Plošni otpor R_0	50...500 Ω	10 Ω ...1 M Ω
Temperaturni koeficijent	$\pm 50 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$	$\pm 150 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$

Plošni otpor $R_0 = \rho/h$ (gdje je ρ specifični otpor, a h debljina filma) je otpor filma kvadratnog oblika bilo koje veličine mjeren između dvije suprotne strane.

Neke ekonomsko-proizvodne značajke. Nakon izrade prvog tiskanog kruga još 1943, proces minijaturizacije elektroničkih krugova i sklopova intenzivno se nastavlja danas kroz hibridnu tehnologiju, koja je omogućila veću gustoću »pakiranja«, veću otpornost prema vibracijama i udarima i veću pouzdanost. Pored toga hibridna se tehnologija debelog filma pokazala prikladnom za visoku automatizaciju proizvodnje, što se ne bi moglo reći za tehnologiju tiskanih krugova.

Pri velikoserijskoj proizvodnji, slično kao i pri izradi monolitnih integriranih krugova, tehnika debelog filma može drastično smanjiti udio radne snage u cijeni finalnog proizvoda. To ujedno postavlja visoko razvijene zemlje u povoljniji položaj i kvalitetno mijenja postojeće odnose. Tehnologija tiskanih krugova pružala je, naime, znatnu šansu u elektronici i nerazvijenim zemljama u kojima je radna snaga jeftina.

Proizvodnja sklopova hibridnom tehnologijom pokazuje povećanje od 1970 vrlo vidni porast i njezino se područje upotrebe



Sl. 102. Elektronički regulator napona za automobil izrađen hibridno u tehnici debelog filma (desno skala u centimetrima)

stalno širi. U Evropi se hibridna tehnologija naglo raširila, pa se nalazi u proizvodnim programima svih većih proizvođača. Oni se sada uglavnom primjenjuju u proizvodima profesionalne i kompjutorske elektronike. U USA, međutim, a također u Japanu, pored intenzivne primjene u spomenutim područjima, i posebno u vojnoj elektronici (koja je i utjecala na njen brzi razvoj), tehnologija filma, naročito debelog, prodire i u elektroniku široke potrošnje i to naročito u automobilskoj industriji. Tipični primjer proizvoda hibridne mikroelektronike u tehnici debelog filma s područja autoelektronike je elektronski regulator napona za automobile prikazan na sl. 102. Može se očekivati da će u 1975 u telekomunikacijama, radiotelekomunikacijama i u automobilskoj elektronici doći do prevlasti tehnologije debelog i tankog filma, a u elektroničkim uređajima široke potrošnje tehnologija debelog filma sigurno će ostvariti golem napredak i bit će kombinirana s klasičnom i monolitnom.

Izbor će između tih tehnologija prvenstveno ovisiti o ekonomskim proračunima i procjenama za svaki pojedini proizvod, a time i stupanj koegzistencije ovih tehnologija, koje su inače među sobom kompatibilne.

M. Kuljiš B. Mencl

LIT.: O svim sastavnim dijelovima: K. R. Spangenberg, Fundamentals of electron devices, New York 1957. — K. Henney, C. Walsh, H. Milaef, eds., Electronic components handbook, 3 vols., New York 1957/58. — B. Ф. Власов, Электронные и ионные приборы, Москва 1960. — Т. Јелакović, Transformatori i prigušnice, Zagreb 1960. — R. Antić, J. Jovanović, M. Miličević, D. Popović, D. Radičević, M. Srebrić, V. Stefanović, Sastavni dijelovi elektroničkih uređaja, Beograd 1963. — R. Marković, Elementi telekomunikacionih i elektroničkih uređaja, Beograd 1963. — B. H. Дулин, Электронные приборы, Москва 1969. — H. Schmellenmeyer, Technologie elektronischer Bauelemente, Berlin 1970. — L. Starke, Leitfaden der Elektronik, Teil 2: Bauelemente der Elektronik in der Praxis, München 1971. — S. D. Prenskey, Electronic instrumentation, Englewood Cliffs, N. J. 1971. — М. Л. Волин, Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре, Москва 1972. — В. Јузбашić, Elektronički elementi, Zagreb 1972. Samo o elektronikama: M. Knoll, B. Kazan, Storage tubes and their basic principles, New York 1952. — P. A. Neeteson, Elektronenröhren in der Impulstechnik (prijevod s engleskog, ima i na francuskom), Eindhoven 1958. — G. Parr, O. H. Davis, The cathode-ray tube and its applications, London 1959. — J. F. Rider, S. D. Usian, Encyclopaedia on cathode-ray oscilloscopes and their use, London 1960. — W. H. Aldous, E. Appleton, Thermionic vacuum tubes, London 1961. — Б. М. Царев, Расчет и конструирование электронных ламп, Москва-Ленинград 1961. — С. В. Свечников, Газотроны и тиратроны, Киев 1961. — R. Marković, Proračunavanje i konstrukcija elektroničkih cevi, Beograd 1962. — H. Köler, Elektronen- und Ionenröhren, Stuttgart 1963. — J. Gewartowski, H. Watson, Principles of electron tubes, Princeton 1965. — R. H. Krackhardt, Vacuum tube electronics, Columbus, Ohio 1966. — H. C. Mende, Radio-Röhren (Wie sie wurden, was sie leisten und anderes, was nicht im Barkhausen steht), München 1966. — R. G. Kloeffler, Electron tubes, New York 1967. — A. P. Banford, The transport of charged particle beams, London 1967. — И. Г. Бергелсон и др., Современные приемно-усилительные лампы, Москва 1967. — А. И. Еркин, Лампы с холодным катодом, Москва 1967. — Ф. М. Яблонский, Г. М. Яким, Декатроны, Москва 1967. — А. О. Жукаев, Электроннолучевые приборы, Москва 1967. — Н. П. Супруга, Новые электроннолучевые приборы, Москва 1968. — H. Barkhausen, Lehrbuch der Elektronenröhren und ihrer technischen Anwendungen, Leipzig: Bd. 1, Allgemeine Grundlagen, 1965; Bd. 2, Verstärker, 1968; Bd. 3, Rückkopplung, 1963; Bd. 4, Gleichrichter und Empfänger, 1965. — R. Millner, Kathodenstrahl-Oszillograph, Grundlagen und Anwendungen, Leipzig 1968. — H. Greif, Kalktathodenröhren, Berlin 1970. Poluvodički sastavni dijelovi: A. И. Губанов, Теория выпрямляющего действия полупроводников, Москва 1956. — A. Coblenz, H. L. Owens, Transistors: theory and applications, New York 1956. — L. P. Hunter, Handbook of semiconductor electronics, New York 1956. — R. D. Middlebrook, An introduction to junction transistor theory, New York 1957. — W. C. Dunlap, Jr., An introduction to semiconductors, New York 1957. — L. Dosse, Der Transistor, ein neues Verstärkerelement, München 1957. — J. De France, Electron tubes and semiconductors, Englewood Cliffs, N. J. 1958. — N. B. Hamay, Semiconductors, New York 1959. — H. Frank, V. Šnejdar, Krystalové elektrony, Praha 1959 (ruski prijevod: Полупроводниковые приборы, Прага 1960; njemački prijevod: Halbleiterbauelemente, 2 Bde, Leipzig 1962). — H. A. Müser, Einführung in die Halbleiterphysik, Darmstadt 1960. — И. Ф. Николаевский, ред., Полупроводниковые триоды и диоды (справочник), Москва 1961. — П. И. Овсичер, Н. Н. Кочкина, Справочник по полупроводниковым диодам и триодам, Ленинград 1961. — R. H. Greiner, Semiconductor devices and applications, New York 1961. — J. R. Tiltman, F. F. Roberts, An introduction to the theory and practice of transistors, New York 1961. — A. B. Phillips, Transistor engineering, New York 1962. — W. Guggenbühl, M. J. Strutt, W. Wundehlin, Halbleiterbauelemente, Bd. 1, Basel-Stuttgart 1962. — С. М. Рыжик, Фотоэлектрические явления в полупроводниках, Москва 1962. — Я. А. Федотов, Основы физики полупроводниковых приборов, Москва 1963. — И. П. Степаненко, Основы теории транзисторов и транзисторных схем, Москва-Ленинград 1963. — W. W. Gärtner, Einführung in die Physik des Transistors (prijevod s engleskog), Berlin-Heidelberg-New York 1963. — R. B. Adler, A. C. Smith, R. L. Longini, Introduction to semiconductor physics, New York 1964. — P. B. Гестем, Г. С. Зиновьев, Туннельные диоды и их применение, Новосибирск 1964. — A. Zidan, Elektronika i tranzistori (priječnik), Zagreb 1965. — A. W. J. Griffin, The thyristor and its application, London 1965. — E. Spenke, Elektronische Halbleiter. Eine Einführung in die Physik der Gleichrichter und Transistoren, Berlin-Heidelberg-New York 1965. — W. W. Passynkov, G. A. Saweljev, L. K. Tschirkin, Nichtlineare Halbleiterwiderstände (prijevod s ruskoga), Leipzig 1965. — V. Čvečić, Poluprovodničke diode i tranzistori, Beograd 1965. — K. S. Nichols, E. V. Vernon, Transistor physics, London 1966. — D. A. Wright, Semiconductors, London 1966. — E. J. Cassinot, Halbleiter, Bd. 1; Physik und Elektronik (prijevod s portugalskog), Eindhoven 1966. — R. D. Thornton, D. de Witt, E. R. Chenette, P. E. Gray, Characteristics and limitations of transistors, New York 1966. — A. Роуз, Основы теории фотопроводимости, Москва 1966. — М. С. Солинский, Полупроводники, Москва 1967. —

H. H. Rumpf, M. Pulvers, Transistor-Elektronik, Halbleiterbauelemente im Schalterbetrieb, Leipzig 1967. — M. A. Lee, B. Easter, H. A. Bell, Tunnel diodes, London 1967. — A. S. Grove, Physics and technology of semiconductor devices, New York 1967. — F. Larin, Radiation effects on semiconductor devices, New York 1967. — H.-F. Hadamowsky (Herausg.), Halbleiterwerkstoffe, Leipzig 1968. — Д. А. Гаерилев, А. М. Скоуров, Технология производства полупроводниковых приборов, Москва 1968. — Л. С. Берман, Введение в физику верицепов, Киев 1968. — S. M. Sze, Physics of semiconductor devices, New York 1969. — R. Paul, Transistoren, Berlin 1969. — A. A. Маслов, Технология и конструкция полупроводниковых приборов, Москва 1970. — W. Braumbeck, Einführung in die Physik und Technik der Halbleiter, Berlin-Heidelberg-New York 1970. — A. Moschitz, Halbleiterelektronik — Wissensspeicher, Berlin 1971. — P. Reinhold, Feldeffekttransistoren, Berlin 1971. — Transistoren-Vergleichstabelle, München 1971. — P. D. Anurum, Semiconductor electronics, Englewood Cliffs, N. J. 1971. — H. F. Wolf, Semiconductors, New York 1971. — R. Müller, Grundlagen der Halbleiter-Elektronik, Berlin-Heidelberg-New York 1971. — Autorenkollektiv, Grundlagen aktiver elektronischer Bauelemente, Leipzig 1972. — Mikroelektronika: L. Holland, Vacuum deposition of thin films, London 1956. — A. J. Khamata, Introduction to integrated semiconductor electronics, New York 1963. — L. Holland, Thin film microelectronics, London 1965. — R. M. Warner, Integrated circuits, design principles and fabrication, New York 1965. — A. Lewicki, Einführung in die Mikroelektronik, München-Wien 1966. — H. Schikorski, Die gedruckte Schaltung, Stuttgart 1966. — K. J. Dean, Integrated electronics, London 1967. — A. J. Khamata, Einführung in die Mikroelektronik (prijevod s engleskog), Berlin 1967. — В. А. Кузьмин, К. Я. Сенамопов, Четырехслойные полупроводниковые приборы, Москва 1967. — C. F. Coombs, Jr., Printed circuits handbook, New York 1967. — H. E. Thomas, Handbook of transistors, semiconductors, instruments, and microelectronics, Englewood Cliffs, N. J. 1968. — M. Bialko, Układy mikroelektroniczne, Warszawa 1969. — H. Sutaner, Gedruckte Schaltungen, München 1969. — И. Е. Ефимов, Современная микроэлектроника, Москва 1971. — A. F. Bogenschütz, Oberflächenchemie und Galvanotechnik in der Elektronik, Saugau/Württ. 1971. — H. E. Thomas, Handbook of integrated circuits, Englewood Cliffs, N. J. 1971. — R. Birchel, Integrierte Schaltungen für den Funkamateur, München 1972. — Б. П. Луковенко, Плоские микромодулы, Москва 1972. — М. Тонфер, Микроэлектроника толстых пленок (prijevod s engleskog, New York 1971), Москва 1973.

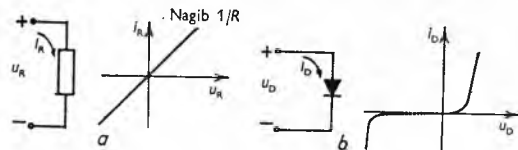
D. Fišer M. Kuljiš B. Mencl

ELEKTRONIKA, SKLOPOVI. Elektronički sklopovi su mreže sastavljene od elektroničkih sastavnih dijelova (aktivnih i pasivnih), koje sačinjavaju za sebe funkcionalnu cjelinu. Od više elektroničkih sklopova tvore se dalje elektronički sustavi i uređaji.

Osnovni postupci analize elektroničkih sklopova

U analizi elektroničkih sklopova teškoće nastupaju zbog nelinearnih karakteristika upotrijebljenih elektroničkih elemenata.

Na sl. 1 dane su karakteristike otpora i poluvodičke diode kao primjeri linearne i nelinearne karakteristike. Da bi se analiza

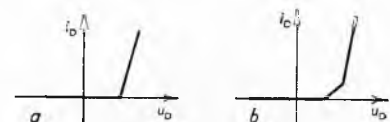


Sl. 1. Linearne i nelinearne karakteristike. a Otpor i njegova karakteristika, b dioda i njena karakteristika; u_R i u_D napon izvora, i_R i i_D struja kroz otpor odnosno kroz diodu

pojednostavniti, karakteristike nelinearnih elemenata često se idealiziraju. Na sl. 2 dana je karakteristika idealne diode. Ovakav postupak idealiziranja karakteristike bit će opravdan ako je signal koji se prenosi preko diode vrlo velik u odnosu prema malom padu napona na njoj (nekoliko desetinki volta na poluvodičkoj diodi) i ako je struja u reverznom smjeru neznatna.



Sl. 2. Karakteristika idealne diode



Sl. 3. Aproximacija karakteristike diode linearnim dijelovima

Nelinearna karakteristika (sl. 1 b) može se približno nadomjestiti linearnim dijelovima (sl. 3 a ili b). U tom slučaju mogu se za ograničena područja primijeniti zakoni koji vrijede za analizu linearnih mreža. Ovakve karakteristike upotrebljavaju se i u analizi elektroničkih sklopova digitalnim računalima.

Kad se radi sa stvarnim karakteristikama, primjenjuje se *grafička analiza*. Ovaj način analize može se upotrijebiti i u linearnim mrežama (sl. 4 a i b).

Kod nelinearnih elemenata ova metoda ima veliko značenje i omogućuje vrlo točnu analizu elektroničkih sklopova za statičke