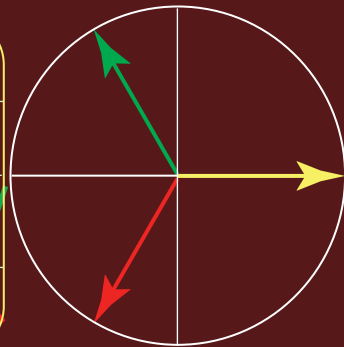
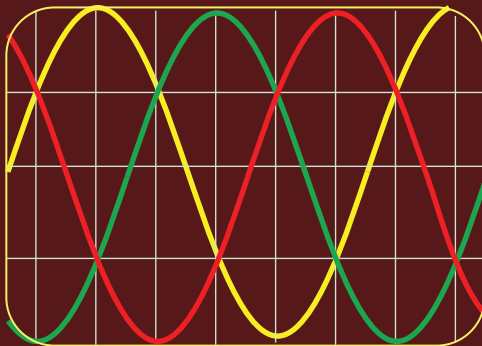


S.Masiokas

Elektro technika



6



Elektronikos
elementai

VADOVĖLIS
AUKŠTOSIOMS
MOKYKLOMS

6.1. Puslaidininkinės medžiagos 151

- 6.1.1. Puslaidininkių laidumas / 151
- 6.1.2. Puslaidininkiniai rezistoriai / 152

6.2. Diodai 153

- 6.2.1. $p-n$ sandūra / 153
- 6.2.2. $p-n$ sandūros voltamperinė charakteristika / 154
- 6.2.3. Lyginimo diodai / 155
- 6.2.4. Specialiosios paskirties diodai / 156

6.3. Tranzistoriai 157

- 6.3.1. Lauko tranzistorius / 157
- 6.3.2. Dvipolis tranzistorius / 159
- 6.3.3. Fototranzistorius / 161
- 6.3.4. Optinė pora / 161

6.4. Tiristoriai 161

- 6.4.1. Diodinis tiristorius – dinistorius / 162
- 6.4.2. Triodinis tiristorius – trinistorius / 162

6.5. Integrinės mikroschemos 163

- 6.5.1. Sluoksninės mikroschemos / 164
- 6.5.2. Puslaidininkinės mikroschemos / 164
- 6.5.3. Hibridinės mikroschemos / 165

6.6. Vakuuminiai elektronikos elementai 165

- 6.6.1. Elektronų emisija / 165
- 6.6.2. Vakuuminės elektroninės lempos / 166
- 6.6.3. Elektroninis vamzdis / 166
- 6.6.4. Fotoelementas ir fotodaugintuvas / 168

6.7. Joniniai reiškiniai ir joniniai elektronikos elementai 169

- 6.7.1. Dujinis išlydis / 169
- 6.7.2. Rusenančiojo išlydžio elementai / 170
- 6.7.3. Lankinio išlydžio elementai / 170

Kontroliniai klausimai ir užduotys 171

Elektronika – tai mokslo ir technikos šaka, tirianti ir praktiškai naudojanti reiškinius, kurie vyksta judant krūvininkams įvairioje aplinkoje (vakuume, dujose, skysčiuose, kietuosiuose kūnuose). Teoriškai ir eksperimentiškai šiuos reiškinius tirianti elektronikos sritis vadinama **fizikine elektronika**.

Techninei elektronikai priskiriama taikomoji elektronikos sritis, tirianti įvairių elektronikos elementų savybes ir taikanti jas praktiškai, konstruojant, gaminant ir naudojant elektroninę aparatūrą. **Elektronikos elementais** vadiname rezistorius, kondensatorius, elektronines lempas, diodus, tranzistorius ir kitus paprasčiausius nedalomus vienetus, turinčius elektroninėje aparatūroje tam tikrą funkcinę paskirtį.

Pagal taikymo sritį techninė elektronika dar skirstoma į pramonės, medicinos, kosmoso ir branduolinę elektroniką. Kiekvienoje iš šių sričių gali būti naudojama įvairios paskirties techninės elektronikos aparatūra. Pavyzdžiui, pramonės įrenginiuose plačiai naudojami ir energetinės, ir informacinės, ir technologinės elektronikos įtaisai.

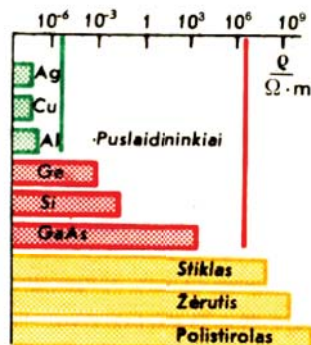
Pagal paskirtį techninę elektroniką galima skirstyti į: **1) energetinę elektroniką** (keičiama gana didelės galios elektros energija); **2) informacinę elektroniką** (informacija apdorojama); **3) radioelektroniką** (informacija perduodama ir priimama); **4) technologinę elektroniką** – eljoniką (medžiagos apdirbamos elektronų ar jonų srautais).

XX a. šeštojo dešimtmečio pabaigoje susiformavo nauja elektronikos šaka – **mikroelektronika**, tirianti, kurianti ir gaminanti kompaktiškas, patikimas ir ekonomiškai integras mikroschemas.

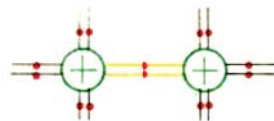
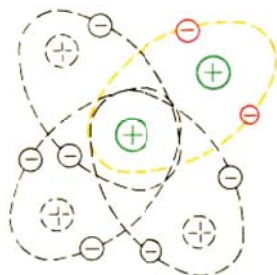
Pastaruosiu metu elektroninė aparatūra plačiai taikoma visose žmogaus veiklos srityse. Ji tampa vis sudėtingesnė, atlieka vis įvairesnes funkcijas. Paskaičiuota, kad 1955 m. viename elektroniniame įrenginyje būdavo iki 10^6 įvairių elementų. Kas dešimtmetį šis skaičius vis didėjo dešimteriopai. Dabar neretame elektroniniame įrenginyje elementų skaičius siekia 10^8 . Šiuolaikiniame lėktuve elektroninės aparatūros masė sudaro apie 3% jo masės, o kosminiame laive – apie 30%.

Elektroninei aparatūrai keliami vis griežtesni reikalavimai: ji turi būti kompaktiška, lengva, patikima, greitavėikė. Pritaikius įvairius puslaidininkinius elementus ir patobulinus jų montavimo būdus (spausdintinės schemos, mikromoduliai), elektroninės aparatūros tūris sumažėjo apie 5000 kartų. Pradėjus gaminti integras mikroschemas, – dar apie 2000 kartų. Žymiai padidėjo veikimo sparta.

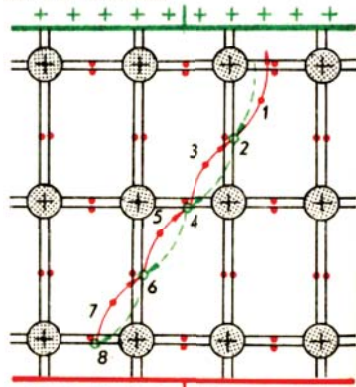
Kalbant apie elektronikos elementus pažymėtina, kad jų voltamperinės charakteristikos dažniausiai yra netiesinės. Dėl to ir dauguma elektroninių grandinių yra ne-



6.1 pav. Puslaidininkinių medžiagų specifinė elektrinė varža lyginant su laidininkų ir dielektrikų



6.2 pav. Keturvalenčio puslaidininkio kristalo plokštuminis modelis ir schema



6.3 pav. Puslaidininkio krūvininkų judėjimas elektriniame lauke

tiesinās. Elektroninēms grandinēms tirti gali būti taikomi anksčiau nagrinēti elektrinių grandinių tyrimo metodai, atsižvelgiant į elektronikos elementų specifines savybes.

6.1

Puslaidininkinēs medžiagos

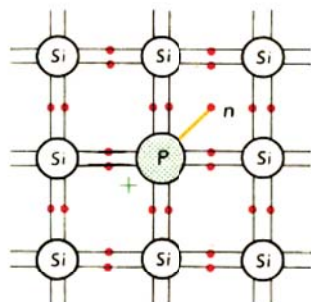
6.1.1. Puslaidininkių laidumas. Dauguma elektronikos elementų gaminami iš puslaidininkių. Tai medžiagos, kurios pagal laidumą elektros srovei yra tarpinės tarp laidininkų ir dielektrikų. Jų specifinė varža yra nuo 10^{-5} iki $10^7 \Omega \cdot m$ (6.1 pav.). Tai germanis (Ge), silicis (Si), galio arsenidas (GaAs), vario oksidas (Cu_2O) ir kitos medžiagos.

Puslaidininkių laidumas elektros srovei kokybiškai skiriasi nuo metalų laidumo. Laisvųjų krūvininkų metaluose yra apie 10^{22} cm^{-3} , o puslaidininkiuose – apie 10^{12} cm^{-3} . Didėjant temperatūrai metalų laidumas mažėja, o puslaidininkių eksponentiškai didėja. Iš atvirkščiai – labai sumažinus temperatūrą, metalai pasidaro superlaidūs, o puslaidininkiai tampa dielektrikais.

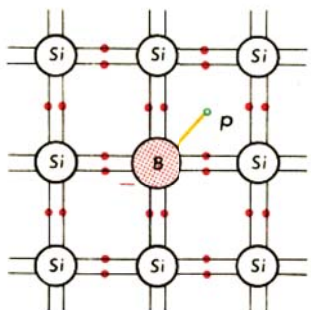
Puslaidininkių savasis laidumas priklauso nuo priemaišų juose ir nuo daugybės išorinių veiksnių: temperatūros, radioaktyviųjų dalelių, šviesos srauto, magnetinio lauko, elektrinio lauko. Priemaišos padidina krūvininkų skaičių puslaidininkyje iki 10^{16} cm^{-3} . Puslaidininkiniuose kristaluose valentiniai elektronai tarp gretimų atomų sudaro stiprius kovalentinius ryšius (6.2 pav.). Tuos ryšius suardžius temperatūros, šviesos ar kitokiu poveikiu, puslaidininkis tampa laidus srovei. Šios puslaidininkių savybės yra panaudojamos kuriant įvairius puslaidininkinius elektronikos elementus.

Puslaidininkio kristale dėl šiluminio atomų svyravimo vienas kitas elektronas išstrūksta ir tampa laisvuuju, t. y. neigiamu krūvininku, – jį žymėsime n (lot. *negativus*). Šio krūvininko vieta lieka tuščia. Tai „skylė“, kurią gali užimti iš kitos gardelės vietos atklydęs elektronas, tačiau dėl to pastarojo vieta tampa nauja skylė. Tuo būdu skylė tarsi persikelia iš vienos vietos į kitą, t. y. tampa judančiu teigiamu krūvininku. Šį teigiamą krūvininką – skylę – pažymėsime p (lot. *positivus*). Jo krūvis yra tokio pat didumo kaip ir elektrono, bet teigiamas. Atomas be vieno elektrono yra teigiamas jonas, kuris nekeičia savo padėties puslaidininkyje. Tuo tarpu skylės gali judėti nuo vieno atomo prie kito. Kai kristalą veikia elektrinis laukas, elektronai juda teigiamu, o skylės – neigiamu elektrodo link (6.3 pav.). Puslaidininkiu teka srovė.

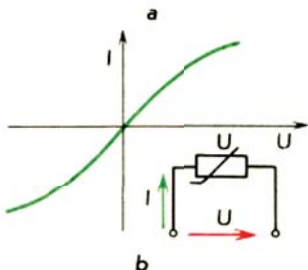
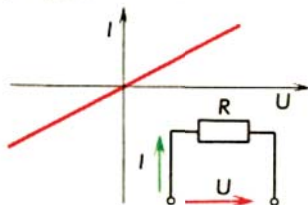
Ypač svarbią reikšmę puslaidininkių laidumui turi priemaišos. Jos padidina laisvųjų krūvininkų skaičių kristale dešimtis ir šimtus tūkstančių kartų, nors jų atomų skaičius sudaro tik vieną milijonąją bendro atomų skaičiaus dalį.



6.4 pav. Silicio kristalas su fosforo (donorinėmis) priemaišomis – n tipo puslaidininkis



6.5 pav. Silicio kristalas su boro (akceptorinėmis) priemaišomis – p tipo puslaidininkis



6.6 pav. Puslaidininkiniai rezistoriai ir jų voltamperinės charakteristikos: a – tiesinis; b – varistorius

Į silicio (Si) kristalą įterpus fosforo (P), užpildomos ne visos kovalentinės jungtys, nes fosforas turi penkis valentinius elektronus, ir vienas iš jų lieka laisvas (6.4 pav.). Toks puslaidininkis vadinamas n tipo puslaidininkiu. Silicio kristale boro (B) priemaišomis padidinamas skylių skaičius, nes boras turi tris valentinius elektronus ir pilnomis kovalentinėmis jungtims su siliciu trūksta vieno elektrono (6.5 pav.). Gaunamas p tipo puslaidininkis. Panašiai n arba p tipo puslaidininkiai gaunami, į keturvalenčio germanio (Ge) kristalą įterpus penkivalenčio stibio (Sb) arba trivalenčio indžio (In).

Priemaišos, kurios padidina elektronų skaičių kristale, vadinamos donorinėmis, o kurios padidina skylių skaičių, – akceptorinėmis. Puslaidininkinės medžiagos, kuriose yra donorinių ar akceptorinių priemaišų, vadinamos legiruotomis.

Realiame puslaidininkyje yra ne tik pagrindiniai krūvininkai, būdingi to tipo puslaidininkiu, bet ir šiek tiek šalutinių. Pavyzdžiui, n tipo silicio kristale pagrindiniai krūvininkai yra elektronai, tačiau yra ir skylių, kurios atsiranda dėl medžiagos dalelių judėjimo, siurus kovalentiniams ryšiams. Šalutinių krūvininkų yra žymiai (10^8 – 10^{10} karto) mažiau nei pagrindinių. Didinant priemaišų kiekį, pagrindinių krūvininkų skaičius didėja, o šalutinių mažėja. Didinant temperatūrą, žymiai didėja šalutinių krūvininkų skaičius ir nežymiai – pagrindinių.

6.1.2. Puslaidininkiniai rezistoriai. Šiuolaikinėje elektroninėje aparaturoje jie sudaro nemažą elektronikos elementų dalį. Dažniausiai rezistoriaus pavadinimas nurodo jo svarbiausias savybes.

Tiesinio rezistoriaus varža beveik nepriklauso nuo jo įtampos ir srovės (6.6 pav., a). Jie gaminami iš silicio (Si) arba iš galio arsenido (GaAs) ir plačiausiai naudojami integrinėse mikroschemose.

Varistorius – tai puslaidininkinis netiesinis rezistorius, kurio varža didėja, stiprėjant juo tekančiai srovei (6.6 pav., b). Varistoriai yra gaminami iš molio ir silicio. Jie naudojami elektrinių grandinių apsaugai nuo viršįtampių.

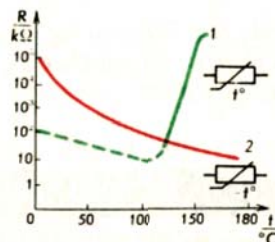
Termorezistoriaus varža labai priklauso nuo temperatūros. Termorezistoriai esti dviejų tipų (6.7 pav.): su teigiamu (1) arba neigiamu (2) temperatūrinio varžos koeficientu. Didėjant temperatūrai, pirmųjų varža didėja, o antrųjų – mažėja (pirmieji naudojami, kai temperatūra yra ne mažesnė kaip 120°C). Termorezistoriai naudojami temperatūrai matuoti ir reguliuoti.

Tenzorezistoriaus varža priklauso nuo jo deformacijos tempiant arba gniuždant. Deformuojant tenzorezistorių, keičiasi jo kristalinė struktūra. Dėl to pakinta krūvininkų skaičius, tuo pačiu ir jo varža (6.8 pav.). Gaminami iš p arba n tipo kristalinio silicio, naudojami deformacijai matuoti.

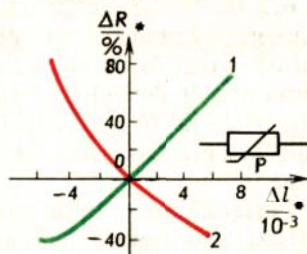
Fotorezistorius – tai puslaidininkinis rezistorius, kurio varža priklauso nuo optinio spinduliavimo šrauto ar šviesos šrauto, tenkančių jo aktyvaus (jautraus) paviršiaus ploto vienetui, t. y. nuo apšvitimo (W/m^2) arba nuo apšviestumo (I_x). Jie naudojami švitinimo arba šviesiniams dydžiams matuoti ir reguliuoti, šviesos signalizacijos ir automatikos grandinėse.

Paprastai fotorezistorių savybes nusako jų fotosrovės I_{Φ} priklausomybė nuo šviesos šrauto bei įtampos U (6.9 pav.). Be to, nurodoma jų tamsinė (fotorezistorius neapšviestas) srovė arba varža; pastaroji esti 10^8 – 10^{10} Ω . Kadangi fotorezistoriai yra nevienodai jautrūs įvairaus bangos ilgio (λ) spinduliavimui, tai jie papildomai apibūdinami spektrinėmis charakteristikomis. Fotorezistoriams būdinga gana didelė inercija mirgančiai šviesai: fotosrovė gali kisti ne didesniu kaip 10 kHz dažniu.

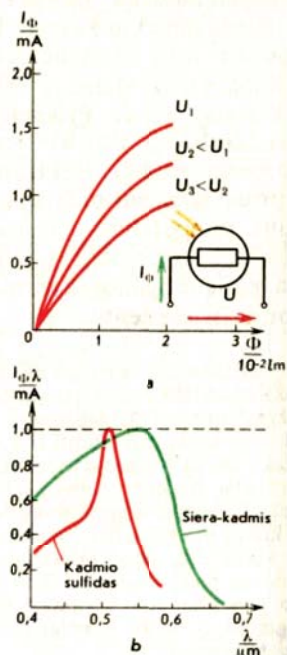
Visų puslaidininkinių rezistorių bendra savybė yra ta, kad jų palyginti nedidelė varža labiau priklauso nuo kurio nors vieno faktoriaus: temperatūros, deformacijos, spinduliavimo šrauto, elektri-



6.7 pav. Termorezistorių sutartiniai ženklai ir charakteristikos



6.8 pav. Tenzorezistoriaus sutartinis ženklas ir p (1) bei n (2) tipo tenzorezistorių santykinio varžos pokyčio $\Delta R/R = \Delta R/R$ priklausomybė nuo santykinės deformacijos



6.9 pav. Fotorezistoriaus schema ir šviesinės (a) bei santykinės (b) spektrinės $I_{\Phi} = I_{\Phi}/I_{\Phi \max}$ charakteristikos

nio, magnetinio lauko ar kt. Kadangi jų varža šiek tiek priklauso ir nuo kitų veiksnių, pastarųjų įtaką dažnai tenka šalinti ar į ją atsižvelgti. Pavyzdžiui, tenzorezistoriaus varža priklauso ne tik nuo deformacijos, bet ir nuo temperatūros. Juo galima naudotis deformacijoms tirti, kai aplinkos temperatūra yra pastovi.

6.2

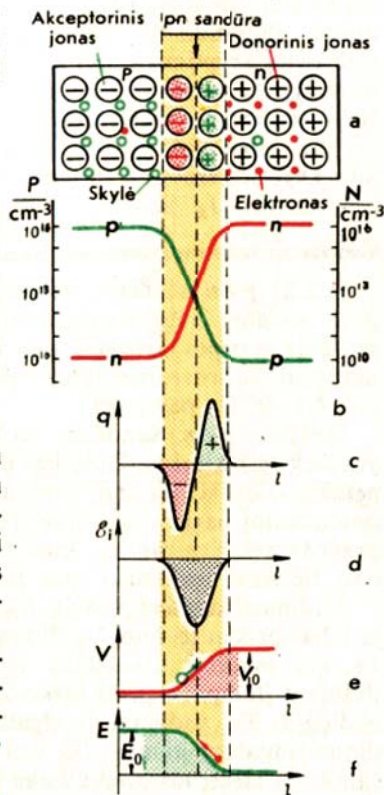
Diodai

6.2.1. $p-n$ sandūra. Į dvi gretimas kristalinio puslaidininkio sritis galima įterpti priemaišų taip, kad vienoje būtų elektroninis laidumas (n tipo), o kitoje – skylinis (p tipo). Tarp šių sričių susidaro pereinamoji zona, vadinama $p-n$ sandūra (6.10 pav., a). Kiekvienoje iš šių sričių yra gausu (apie 10^{16} cm^{-3}) pagrindinių krūvininkų ir daug mažiau (apie 10^{10} cm^{-3}) – šalutinių. Sandūroje vyksta sudėtingi fizikiniai procesai, kurie išsamiau yra nagrinėjami fizikos kurse. Toliau susipažinsime tik su kai kuriomis $p-n$ sandūros savybėmis, kuriomis yra pagrįstas puslaidininkinių elektronikos elementų veikimas.

Sandūroje (žr. 6.10 pav.) vienokio laidumo srities krūvininkų tankis palaipsniui mažėja, pereinant į kitokio laidumo puslaidininkio sritį, kur prilygsta šalutinių krūvininkų tankiui. Abiejų sričių krūvininkai difunduoja į priešingo laidumo sritis, todėl sandūroje vyksta rekombinacija – krūvininkai neutralizuojasi. Dėl to pačioje sandūroje lieka donoriniai ir akceptoriniai jonai, kurie sudaro sandūroje erdvinį krūvį. Dėl erdvinio krūvių potencialų skirtumo sandūroje susidaro vidinis elektrinis laukas \mathcal{E}_i bei potencialinis barjeras. **Potencialinis barjeras V_0** neleidžia skylėms toliau difunduoti į n sritį. Tam, kad skylė galėtų įveikti potencialinį barjerą, reikia, kad išorinis energijos šaltinis jai suteiktų papildomą energiją. Tokio pat didumo, tik priešingo ženklo potencialinis barjeras E_0 neleidžia elektronams savaime judėti į p sritį.

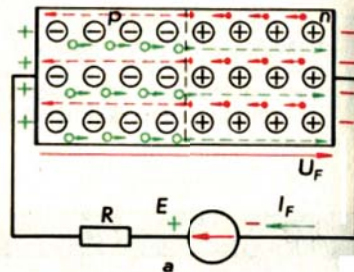
Prijungus prie n srities neigiamą, o prie p srities teigiamą potencialą (6.11 pav., a), krūvininkai, veikiami išorinio elektrinio lauko, juda sandūros kryptimi, ir, įgiję papildomą kinetinę energiją, „įveikia“ potencialinį barjerą. Tam reikia, kad kristalinio silicio sandūros įtampa būtų ne mažesnė kaip 0,6 V, o germanio – kaip 0,2 V. Šios krypties srovė ir įtampa yra vadinamos tiesioginėmis ir žymimos I_F ir U_F .

Prijungus prie n srities teigiamą potencialą (6.11 pav., b), o prie p srities – neigiamą, sandūroje atsiranda daugiau donorinių ir akceptorinių jonų, sustiprėja vidinis elektri-



6.10 pav. Puslaidininkinio kristalo $p-n$ sandūra (a), krūvininkų tankio pasiskirstymas (b), jonų skaičius (c), elektrinio lauko stiprumas (d), potencialinis barjeras skylei (e) bei elektronui (f)

nis laukas. Tai tolygu dirbtiniam potencialinio barjero padidiniui. Pagrindiniai krūvininkai tik pasislenka išorinių elektrodų kryptimi, todėl sandūros zona prasiplečia, sandūra lyg pastorėja. Šalutiniai krūvininkai juda link priešingo poliarumo elektrodų. Kadangi šalutinių krūvininkų yra labai mažai, tai ir jų srovė taip pat yra labai silpna. Šios krypties srovė ir įtampa yra vadinamos atgalinėmis ir žymimos I_R ir U_R .



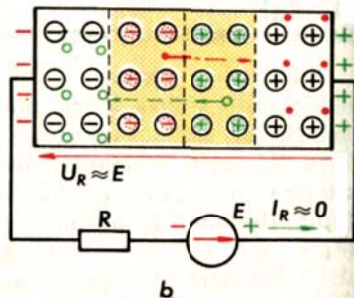
6.2.2. p-n sandūros voltamperinė charakteristika. Jei p-n sandūra būtų ideali, tiesiogine kryptimi ji praleistų srovę ir įtampos kritimas joje būtų lygus nuliui. Atgaline kryptimi ja srovė netekėtų, nesvarbu kokio didumo įtampa U_R (6.12 pav., a).

Realios p-n sandūros voltamperinė charakteristika yra šiek tiek kitokia. Didinant tiesioginę įtampą U_F , srovė neteka, kol ši įtampa yra mažesnė už p-n sandūros potencialinį barjerą V_0 . Kai įtampa U_F pasidaro lygi V_0 , pradeda tekėti srovė I_F , kuri pradžioje netiesiškai, o vėliau tiesiškai priklauso nuo tiesioginės įtampos U_F .

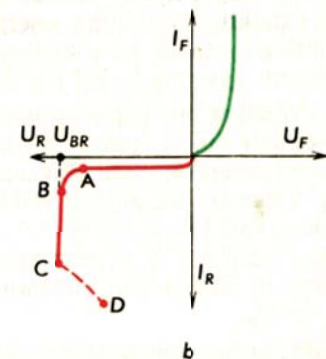
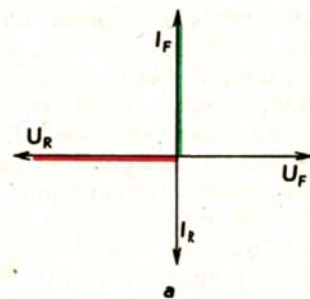
Didinant atgalinę įtampą U_R , atgalinė srovė I_R pradžioje labai priklauso nuo U_R didumo, bet ji yra palyginti maža, nes šalutinių krūvininkų yra palyginti nedaug. Toliau didinant įtampą U_R (iki taško A), atgalinė srovė I_R beveik nedidėja. Tai vadinamoji atgalinė soties srovė. Dar padidinus atgalinę įtampą iki vertės U_{BR} , prasideda p-n sandūros elektrinis pramušimas (6.12 pav., b, charakteristikos dalis B-C). Jam būdinga tai, kad sandūros varža labai sumažėja, todėl net ir dėl nedidelio atgalinės įtampos prieaugio atgalinė srovė labai padidėja. Nors elektrinio pramušimo sąlygomis atgalinė srovė yra stipresnė už normalaus režimo leistiną atgalinę srovę, p-n sandūroje neįvyksta jokių puslaidininkio struktūrinių pakeitimų.

Jei atgalinė srovė tiek sustiprėtų, kad taptų didesnė už elektrinio pramušimo srovę (charakteristikos dalis C-D), p-n sandūra neleistinai įšiltų, ir puslaidininkyje įvyktų struktūriniai pakeitimai. Tai vadinamasis šiluminis pramušimas, po kurio puslaidininkinis elementas jau pasidaro netinkamas vartoti.

Pagrindinių ir ypač šalutinių krūvininkų skaičius priklauso nuo puslaidininkio temperatūros (padidėjus temperatūrai 10°C, šalutinių krūvininkų skaičius padidėja dvigubai). Dėl to p-n sandūros voltamperinė charakteristika šiek tiek pakinta. Pavyzdžiui, esant tai pačiai įtampai, p-n sandūra teka didesnė tiesioginė ir atgalinė srovė, kai temperatūra aukštesnė. Kad puslaidininkinių elementų darbo režimas būtų pakankamai stabilus, nurodomos jų leistinos temperatūros.



6.11 pav. Krūvininkų judėjimas, veikiant išorinei EVJ: a – tiesiogine ir b – atgaline kryptimi



6.12 pav. p-n sandūros voltamperinės charakteristikos

6.2.3. Lyginimo diodai. Elementas, kuriame yra viena $p-n$ sandūra ir kuris turi du išvadás, vadinamas puslaidininkiniu diodu. Lyginimo diodai (dažnai vadinami tiesiog diodais) sudaro didžiausią visų puslaidininkinių diodų dalį. Jie yra naudojami įvairiuose lygintuvuose kintamajai srovei paversti nuolatine.

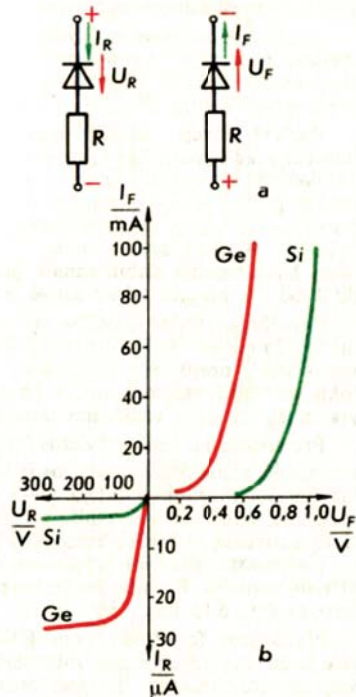
Dažniausiai naudojami germanio ir silicio diodai (6.13 pav.). Iš jų voltamperinių charakteristikų matyti, kad, esant vienodoms įtampoms, germanio diodo ir tiesioginė, ir atgalinė srovė yra didesnė. Tai reiškia, kad jo tiesioginė ir atgalinė varžos yra mažesnės už silicio diodo. Dėl to tiesioginės įtampos kritimas germanio diode yra palyginti nedidelis (Ge – 0,6 V, Si – apie 1,0 V), bet jam būdingos didesnės nei silicio diodo atgalinės srovės.

Tekant srovei diodu, dėl jo varžos išsiskiria tam tikras šilumos kiekis – diodas kaista. **Kuo stipresnė tiesioginė srovė ir kuo didesnis tiesioginės įtampos kritimas, tuo didesni nuostoliai diode.** Todėl yra ribojamas diodo srovės tankis, kuris $p-n$ sandūros plote neturi būti didesnis kaip $1-10 \text{ A/mm}^2$ (priklausomai nuo aušinimo sąlygų). **Diodo temperatūra turi būti ne didesnė už leistiną: germanio diodų – 75°C , silicio – 175°C .** Kadangi šilumos kiekis priklauso ne tik nuo įtampos kritimo diode ir juo tekančios srovės, bet ir nuo jos tekėjimo laiko, tai **trumpą laiką yra leistinos gana stiprios srovės.** Tai yra gera diodų savybė, nes praktikoje pasitaiko įvairių trumpalaikių avarinių režimų, nuo kurių diodus sunku apsaugoti. **Diodų srovės gali būti 50–100 kartų didesnės už vardines, jei trunka ne ilgiau kaip 0,1 s.**

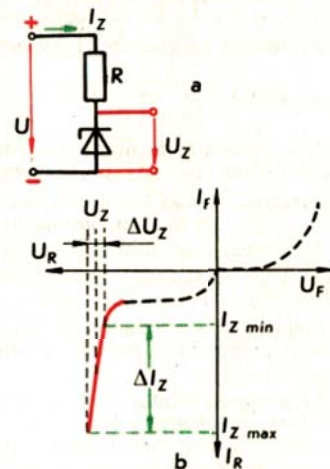
Ilgą laiką diodų perkrauti negalima, nes, pakilus temperatūrai, suardoma jų puslaidininkinė struktūra. Norint to išvengti, diodus reikia aušinti. Prie jų korpuso pritvirtinami įvairių konstrukcijų radiatoriai, kurie sklaido šilumą natūralios konvekcijos būdu, arba apipučiant juos oru, arba praleidžiant jais aušinantįjį skystį.

Labai svarbi lyginimo diodų charakteristika yra **leistinoji atgalinė įtampa $U_{R \text{ max}}$.** Tai didžiausia atgalinė įtampa, kurią pasiekus diodas dar elektriškai nepramušamas. Paprastai nurodoma diodo atgalinė soties srovė, o jei diodai skirti didesnio dažnio srovėms, – ir elektrinė talpa.

Šiuolaikiniai lyginimo diodai yra gaminami labai dideliu tiesioginių srovių ir atgalinių įtampų diapazonui. Pagal tiesioginę srovę diodai gali būti skirstomi į silpnų (iki 0,3 A), vidutinių (nuo 0,3 iki 10 A) ir stiprių srovių (daugiau kaip 10 A). Jie yra gaminami iki 2000 V atgalinei įtampai.



6.13 pav. Lyginimo diodo atgalinė ir tiesioginė įtampa bei srovė (a); Ge ir Si diodų voltamperinių charakteristikų pavyzdžiai (b) (tiesioginių ir atgalinių srovių bei įtampų masteliai nevienodi)



6.14 pav. Stabilitrono schema (a) ir voltamperinė (b) charakteristika

6.2.4. Specialiosios paskirties diodai. Tai tokie puslaidininkiniai diodai, kuriuose $p-n$ sandūros ypatybės taikomos kokiam nors specialiam efektui sukelti. Prie tokių priskiriami stabilitronai, fotodiodai, šviečiantieji diodai ir kai kurie kiti.

Puslaidininkinis stabilitronas – tai diodas, kuris naudojamas įtampai stabilizuoti, kai juo tekanti srovė kinta tam tikrose ribose. Diodas dirba elektrinio pramušimo režimu (6.14 pav.), t. y. įjungiamas taip, kad jo $p-n$ sandūra tekėtų atgalinė srovė. Srovei kintant nuo I_{Zmin} iki I_{Zmax} , stabilizuojamoji įtampa U_Z beveik nekinta. Kad neįvyktų šiluminis pramušimas, specialiai pagerinamas diodo aušinimas. Išleidžiamais stabilitronais galima stabilizuoti įtampą nuo 2,6 iki 1000 V; jais gali tekėti srovė nuo $3 \cdot 10^{-3}$ iki 2 A.

Fotodiodas (6.15 pav.) – tai optiniam spinduliavimui jautrus diodas, kurio veikimas pagrįstas vidiniu fotoefektu. Kai fotodiodas jautrus šviesai, neapšviesto fotodiodo voltamperinė charakteristika yra tokia pat kaip lyginimo diodo. Jo atgalinė srovė, kai jis neapšviestas, yra labai maža; ji vadinama tamsine srove.

Pro specialų langelį apšviestus fotodiodo $p-n$ sandūrą, dalis elektronų įgana papildomos energijos ir išsilaisvina. Pagrindinių ir šalutinių krūvininkų skaižus padidėja. $p-n$ sandūros vidinio elektrinio lauko veikiami, šalutiniai krūvininkai sudaro tarp fotodiodo gnybtų potencialų skirtumą – fotoelektrovaros jėgą, kuri gali siekti 0,5–0,9 V.

Fotodiodas gali būti jungiamas dviem režimais – generatoriaus ir šviesos keltiklio. Fotodiodo darbo režimą nurodo specialus sutartinis ženklas (žr. 6.15 pav., b ir c).

Naudojant fotodiodą kaip EVJ šaltinį (generatoriaus režimu), prie jo gnybtų prijungiamas mikroampermetras. Kuo mažesnė mikroampermetro varža, tuo didesnė fotosrovė teka grandine, esant tam pačiam fotodiodo apšviestumui. Paprastai mikroampermetro varža laikoma lygia nuliui, o tai tolygu fotodiodo gnybtų trumpajam jungimui. Didinant fotodiodo apšviestumą, daugėja šalutinių krūvininkų, todėl stiprėja diodo atgalinė trumpojo jungimo srovė (6.16 pav., voltamperinių charakteristikų ordinatės: Oa, Ob, Oc, Od). Generatoriaus režimu veikiantys diodai dar vadinami generatoriniais fotoelementais.

Kai norima, kad fotodiodas dirbtų kaip šviesos keltiklis, jo atgalinė kryptimi prijungiamas EVJ šaltinis. Fotodiodu teka atgalinė srovė (žr. 6.16 pav.), kurios stiprumas priklauso nuo fotodiodo apšviestumo.

Fotodiodai apibūdinami jautrumu

$$S = I_k / \Phi_p; \quad (6.1)$$

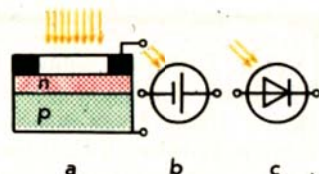
čia I_k – fotodiodo trumpojo jungimo srovė, Φ_p – fotodiodo aktyviajam paviršiumi tenkantis šviesos srautas.

Paprastai seleno fotodiodų jautrumas yra 0,3–0,75 mA/lm, silicio – apie 3,0 mA/lm, germanio – iki 20 mA/lm.

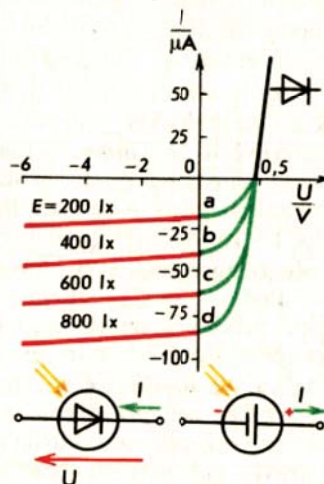
Fotodiodai dar apibūdinami jų spektrinėmis charakteristikomis (6.17 pav.). Tai santykinio spektrinio jautrumo $S_x = S/S_{max}$ priklausomybės nuo spinduliavimo bangos ilgio λ .

Fotodiodai yra naudojami šviesiniams dydžiams matuoti, automatisk grandinėse. Specialūs generatoriniai fotoelementai naudojami saulės baterijose.

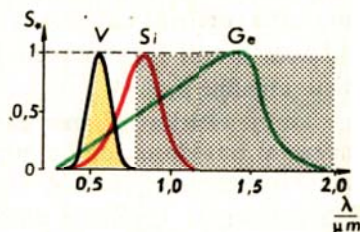
Šviečiantysis diodas – tai puslaidininkinis diodas, kuriame rekombinuojant krūvininkams išsilaisvinama energija ir išspinduliuojami šviesos kvantai. Šviesa spinduliuojama iš $p-n$ sandūros pro specialų langelį. Kadangi šviečiantieji diodai yra taikomi signalizacijai bei informacijos indikacijai, tai paprastai nurodomas jų sklaidžiamos šviesos spektras (spektrinė charakteristika) ir skaištis.



6.15 pav. Fotodiodo sandara (a) ir sutartiniai ženklai, kai jis dirba generatoriaus (b) ir šviesos keltiklio (c) režimu



6.16 pav. Fotodiodo voltamperinės charakteristikos



6.17 pav. Spektrinės germanio (Ge) ir silicio (Si) fotodiodų charakteristikos ir žmogaus akies santykinio spektrinio jautrumo kreivė (V)

Tranzistoriai

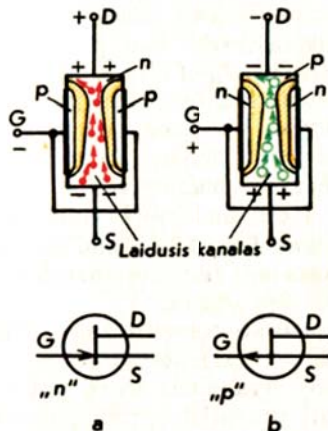
Tranzistorius – tai stiprinimo savybėmis pasižymintis puslaidininkinis elementas, kuriame yra viena ar daugiau $p-n$ sandūrų. Paprastai tranzistorius turi tris ar daugiau išvadų.

6.3.1. Lauko tranzistorius. Tai toks tranzistorius, kurio srovė valdoma elektriniu lauku, t. y. keičiant valdymo elektrodo potencialą. Lauko tranzistoriuje yra viena $p-n$ sandūra (6.18 pav.), statmena srovės tekėjimo kryptčiai. Srovė gali tekėti lauko tranzistoriaus laidžioju kanalu, kuris esti iš n arba p tipo puslaidininkio. Elektrodas, iš kurio išteka pagrindiniai krūvininkai, yra vadinamas ištaka (S), o į kurį jie suteka – santaka (D). Valdymo elektrodas yra prijungtas prie kitokio tipo puslaidininkio nei laidusis kanalas ir vadinamas užtūra (G). Tarp G ir S susidaro $p-n$ sandūra, kurios tiesioginę kryptį rodo sutartinio ženklų rodyklė, nukreipta iš p į n sritį.

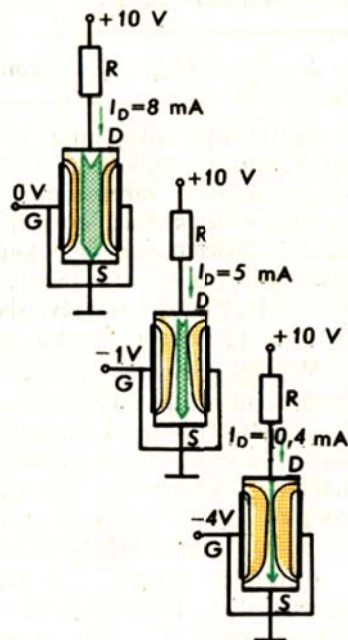
Išnagrinėsime lauko tranzistoriaus su n tipo laidžioju kanalu (6.19 pav.) veikimo principą. Pagrindiniai n tipo puslaidininkio krūvininkai yra elektronai. Tarp santakos D ir ištakos S prijungiama įtampa U_{DS} . Kai valdymo įtampa $U_{GS}=0$, laidžioju kanalu elektronai juda iš ištakos į santaką; tranzistoriumi teka srovė I_D . Kai užtūrai G suteikiamas potencialas, neigiamesnis nei ištakos ($U_{GS} < 0$), tai reiškia, kad prie sandūros $G-S$ yra prijungiama atgalinė įtampa. Dėl to sandūros storis padidėja, o laidžiojo kanalo skerspjūvis sumažėja. Tuo būdu padidėja laidžiojo kanalo varža ir susilpnėja tranzistoriaus srovė I_D . Kuo neigiamesnis užtūros G potencialas ištakos S atžvilgiu, tuo silpnesnė tranzistoriaus srovė. Parinkus tam tikrą neigiamo užtūros G potencialo vertę, galima pasiekti, kad tranzistoriumi srovė praktiškai netekėtų – laidusis kanalas tampa tarsi dielektriku.

Lauko tranzistoriaus su p tipo laidžioju kanalu veikimo principas yra toks pat. Lauko tranzistorių su n ir p tipo laidžioju kanalu jungimo schemas yra tokios pat, bet jų vienvardžiams elektrodams suteikiami priešingų ženklų potencialai. Kadangi lauko tranzistoriumi srovė teka, judant vieno poliarumo krūvininkams, jis kartais dar vadinamas vienpoliu (unipoliariniu).

Svarbiausios lauko tranzistoriaus charakteristikos yra perdavimo ir išėjimo (6.20 pav.). Perdavimo charakteristika yra tranzistoriaus srovės priklausomybė nuo valdymo įtampos: $I_D = f(U_{GS})$, esant pastoviai įtampai: $U_{DS} =$



6.18 pav. Lauko tranzistoriaus sandara ir sutartinis ženklas: a – su n tipo ir b – su p tipo laidžioju kanalu



6.19 pav. Lauko tranzistoriaus srovės I_D valdymas užtūros G neigiamu potencialu

const. Išėjimo charakteristika yra tranzistoriaus srovės priklausomybė nuo jo įtampas, esant pastoviai valdymo įtampai: $I_D = f(U_{DS})$, kai $U_{GS} = \text{const}$. Kaip matome, didinant tranzistoriaus įtampą U_{DS} , jo srovė I_D pradžioje didėja, kol pasiekia soties srovę. Soties srovė priklauso tik nuo valdymo įtampas U_{GS} . Paprastai yra sudaroma išėjimo charakteristikų šeima.

Nesigilindami į vidinius procesus, lauko tranzistorių galime laikyti valdomu netiesiniu rezistoriumi, kurio volt-ampėrinės (išėjimo) charakteristikas galima keisti, keičiant valdymo įtampą.

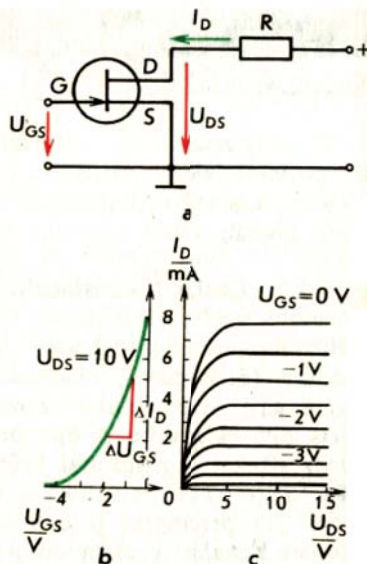
Lauko tranzistoriaus įėjimo varža esti labai didelė ($R_{in} > 10^8 \Omega$), nes tai yra $p-n$ sandūros atgalinė varža. Užtūros grandinės srovė yra $p-n$ sandūros atgalinė srovė, kuri yra tokia silpna (nuo 10^{-12} iki 10^{-9} A), kad praktiškai laikoma lygia nuliui. Matome, kad lauko tranzistorius yra valdomas labai mažos galios užtūros grandinės signalu. Antra vertus, išėjimo grandinės galia yra daug didesnė ir ją galima keisti gana plačiose ribose, keičiant tranzistoriaus srovę I_D (žr. 6.20 pav., b). Kitaip sakant, lauko tranzistorius yra signalą stiprinantis elektronikos elementas. Jo stiprinimą nusako **perdavimo charakteristikos statusas S**, esant pastoviai tranzistoriaus įtampai:

$$S = \Delta I_D / \Delta U_{GS}, \quad U_{DS} = \text{const}. \quad (6.2)$$

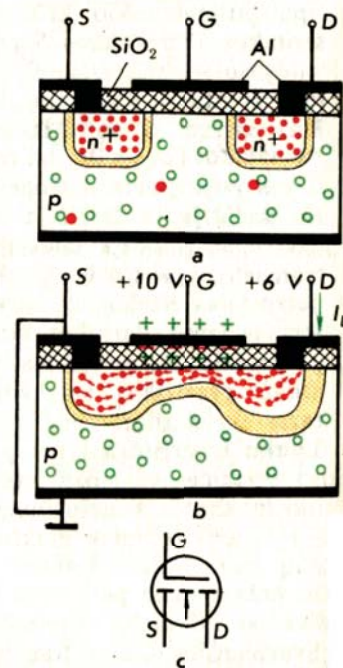
Pastaruoju laiku labai plačiai (ypač integrinėse mikroschemose) naudojami MDP tipo lauko tranzistoriai. Jų pavadinimo santrumpa yra pirmosios raidės žodžių: metalas – dielektrikas – puslaidininkis. Jų užtūros elektrodas G izoliuojamas nuo kanalo dielektriku. Kai dielektrikas yra oksidas (dažniausiai SiO_2), tranzistoriai vadinami MOP lauko tranzistoriais. Kaip ir visų lauko tranzistorių, jų laidusis kanalas gali būti n arba p tipo.

Veikimo principui paaiškinti pasirinksiame MOP tranzistorių su n tipo laidžiuoju kanalu (6.21 pav.). Jo pagrindą sudaro p tipo puslaidininkis, kuris prie ištakos S ir santakos D elektrodų yra gausiai legiruotas donorinėmis priemaisomis. Gaunamos dvi puslaidininkio sritys, pažymėtos ženklais n^+ , kuriose gausu neigiamų krūvininkų, o tarp šių sričių ir pagrindo susidaro dvi $p-n$ sandūros.

Prijungus įtampą U_{DS} , kai valdymo įtampa $U_{GS} = 0$, srovė neteka. Padavus užtūrai G teigiamą potencialą (valdymo įtampa $U_{GS} > 0$), įvyksta dielektriko poliarizacija: dielektriko dipoliai orientuojami taip, kad prie užtūros G elektrodo susidaro neigiami, o kitoje sluoksnio pusėje – teigiami krūviai. Pastarieji sutraukia iš pagrindo šalutinius, taip pat iš ištakos S n^+ srities neigiamų krūvinink-



6.20 pav. Lauko tranzistoriaus jungimo schema (a), perdavimo (b) ir išėjimo (c) charakteristikos



6.21 pav. MOP tranzistoriaus sandara (a), n tipo kanalo susidarymas (b) ir sutartinis ženklas (c)

kus. Tarp santakos ir ištakos susidaro n kanalas, kuriuo gali tekėti srovė I_D . Kuo didesnė valdymo įtampa U_{GS} , tuo didesnis laidžiojo kanalo skerspjūvis, tuo mažesnė jo varža ir stipresnė srovė juo teka.

MDP tranzistoriaus sutartinis ženklas (6.21 pav., c) rodo jo sandarą, o rodyklės kryptis – p – n sandūros tiesioginę kryptį. Kai tranzistorius yra nedaloma mikroschemos dalis, jo sutartinis ženklas apskritimu neapvedamas.

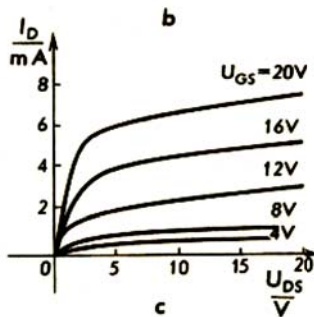
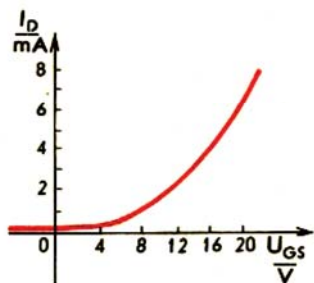
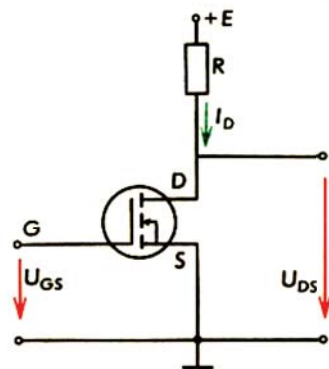
MDP tranzistoriaus jungimo schema ir charakteristikos (6.22 pav.) panašios į sudaryto tik iš puslaidininkių lauko tranzistoriaus, nors yra ir skirtumų. MDP lauko tranzistorius su n kanalu yra valdomas teigiamu (ir nemažu) užtūros potencialu. Skirtingai nuo ankstesnio, MDP tranzistorius yra nelaidus srovei, kai valdymo įtampos nėra: $U_{GS}=0$. Tam, kad srovė galėtų tekėti, reikalinga tam tikra U_{GS} vertė. Valdymo įtampą didinant, srovė I_D stiprėja. MDP tranzistorių įėjimo varža yra dar didesnė: $R_{in}=10^{10}-10^{15} \Omega$, o valdymo srovė apie 1000 kartų mažesnė. Jie valdomi dar mažesnės galios signalais, jų nuostolių galia labai maža.

MDP tranzistorių gamybos technologija labai paprasta, jie yra labai kompaktiški. MDP tranzistoriai sudaro didelę dalį plačiai naudojamų autonominių įtaisų (mikrokalkuliatorių, elektroninių laikrodžių, kai kurių automatikos įrenginių) mikroschemų elementų.

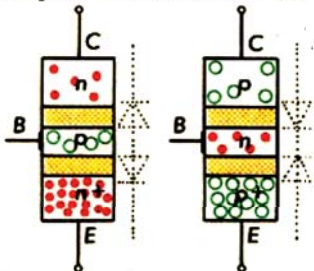
Reikia pastebėti, kad visiems lauko tranzistoriams yra būdinga nemaža įėjimo grandinės talpa ($C_{GS} \approx C_{GD} = 1-10$ pF). Dėl to lauko tranzistoriai netaikomi didelio dažnio ar greitaveikiuose elektroniniuose įrenginiuose.

6.3.2. Dvipolis tranzistorius. Tai trijų sluoksnių puslaidininkinis tranzistorius, kuriame yra dvi p – n sandūros. Dvipoliai tranzistoriai gali būti sudaryti iš n – p – n arba p – n – p tvarka išdėstytų puslaidininkių (6.23 pav.). Abiejų tipų tranzistorių veikimo principas ir savybės yra tokios pat, bet prie jų vienvardžių elektrodų yra prijungiami priešingo poliarumo potencialai ir srovės jais teka priešingomis kryptimis.

Dvipolio tranzistoriaus vidurinis sluoksnis yra vadinamas baze (B) ir turi mažai krūvininkų (mažai legiruotas). Bazė yra labai plona: apie $100 \mu\text{m}$ pavieniuose ir apie $0,1 \mu\text{m}$ integrinių mikroschemų tranzistoriuose. Vienas iš gretimų bazei sluoksnių turi daug krūvininkų (gausiai legiruotas), todėl pažymėtas n^+ arba p^+ ženklais. Jis gali skleisti (emituoti) krūvininkus į bazę, todėl vadinamas emiteriu (E). Iš kitos bazės pusės esantis sluoksnis, vadinamas kolektoriumi (C), turi vidutinį krūvininkų tankį. Tarp gretimų sluoksnių susidaro dvi p – n sandūros, kurių tiesioginės kryptys yra



6.22 pav. MDP tranzistoriaus jungimo schema (a), perdavimo (b) ir išėjimo charakteristikos (c)



6.23 pav. Dvipolio tranzistoriaus sandara: a – n – p – n ir b – p – n – p tipo

priešingos: $B-E$ ir $B-C$ ($n-p-n$ tipo tranzistoriuje) bei $E-B$ ir $C-B$ ($p-n-p$ tipo tranzistoriuje). Sutarti- nuose ženkluose **emiterio rodyklė** yra nukreipta $B-E$ sandūros tiesiogine kryptimi: **iš p į n . Ji rodo bazės-emiterio grandinės srovės kryptį** (žr. 6.23 pav.).

Veikimo principui paaiškinti pasirinkime $n-p-n$ tipo tranzistorių (6.24 pav.). Tokio tipo tranzistoriaus pagrindiniai krūvininkai yra elektronai, kurių yra gausu emiteryje E . Tarp kolektoriaus C ir emiterio E prijungiamas įtampa U_{CE} . Kai bazės potencialas yra toks pat kaip emiterio ($U_{BE}=0$), sandūra $B-E$ srovė neteka: $I_B=0$, $I_E=0$. Įtampa $U_{CE}=U_{CB}$ yra atgalinė $B-C$ sandūros įtampa, todėl sandūra $B-C$ tarsi pastorėja ir, nepaisydami jos atgalinės srovės, galime laikyti, kad ja srovė taip pat neteka: $I_C \approx 0$.

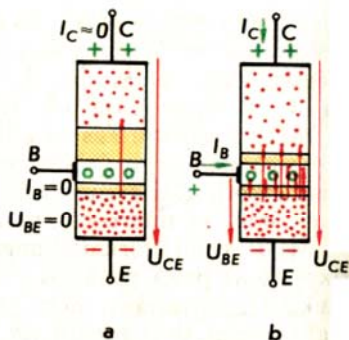
Paduokime bazei B teigiamą, bet mažesnę negu kolektoriaus C , potencialą. Įtampa U_{BE} yra tiesioginė sandūros $B-E$ įtampa, todėl šia sandūra iš emiterio į bazę pradeda judėti pagrindiniai krūvininkai – elektronai. Dalis jų rekombinuoja su bazės skylėmis, sudarydami bazės srovę I_B . Bazėje skylių koncentracija yra nedidelė, o bazės sluoksnis yra labai plonas, todėl didžioji dalis elektronų pasiekia $B-C$ sandūrą ir dreifuoja pro ją. Kadangi įtampa $U_{CB} > 0$ ir gana didelė ($U_{CB} \gg U_{BE}$), tai elektrinio lauko veikiami elektronai juda į kolektorių C , t. y. teka kolektoriaus srovė I_C . Pagal I Kirchhofo dėsnį: $I_E = I_B + I_C$. Kadangi $I_B \ll I_C$, apytiksliai galime laikyti, kad $I_E \approx I_C$.

Kuo daugiau krūvininkų patenka iš emiterio į bazę, tuo stipresnė bazės srovė I_B , ir tuo stipresnė kolektoriaus srovė I_C . Tuo būdu kolektoriaus srovė I_C yra valdoma bazės srove I_B ; tai iliustruoja 6.25 pav. Priklausomybė $I_C = f(I_B)$ yra vadinama dvipolio tranzistoriaus perdavimo charakteristika. Dvipolio tranzistoriaus srovės perdavimo koeficientas išreiškiamas kolektoriaus ir bazės srovių pokyčių santykiu:

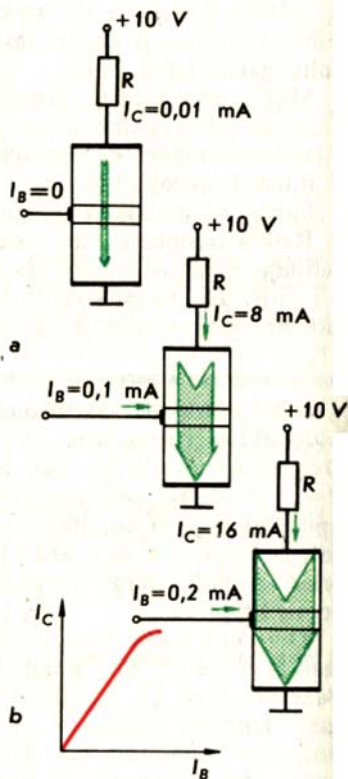
$$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B, \quad (6.3)$$

kuris pavieniams tranzistoriams gali būti nuo 20 iki 200, o mikroschemose – net iki 5000 (superbeta tranzistoriai).

Dvipoliai tranzistoriai dažniausiai jungiami pagal bendro emiterio schemą (6.26 pav., a), kuria ir pasinaudojome veikimo principui aiškinti. Dvipoliai tranzistoriai apibūdinami įėjimo ir išėjimo charakteristikų šeimomis (6.26 pav., b ir c). **Įėjimo charakteristikos** yra $I_B = f(U_{BE})$, kai $U_{CE} = \text{const}$, o **išėjimo**: $I_C = f(U_{CE})$, kai $I_B = \text{const}$. Kaip matome, kolektoriaus srovės nepriklauso nuo įtampos U_{CE} , o priklauso nuo bazės srovės I_B .



6.24 pav. Dvipolio $n-p-n$ tranzistoriaus schema veikimo principui aiškinti: a – $U_{BE}=0$; b – $U_{BE} > 0$



6.25 pav. Dvipolio tranzistoriaus kolektoriaus srovės I_C valdymas bazės srove I_B (a) ir perdavimo charakteristika (b)

Kaip ir lauko tranzistorius, **dvipolis tranzistorius yra stiprinimo elementas**. Jį taip pat galime laikyti valdomu netiesiniu rezistoriumi, kurio voltamperinės (išėjimo) charakteristikos yra keičiamos, keičiant bazės srovę. Pavadinimui **dvipolis (bipoliarinis)** nurodoma, kad šiuo tranzistoriumi srovė teka, judant teigiamiems ir neigiamiems krūvininkams.

6.3.3. Fototranzistorius. Jis sudarytas panašiai kaip dvipolis tranzistorius, tik jo valdymui yra panaudojamas optinis spinduliavimui arba tik šviesai jautrus bazės sluoksniu, esantis $B-C$ sandūroje (6.27 pav.). Dėl spinduliavimo srauto Φ_e poveikio jam jautriame bazės sluoksnyje atsiranda papildomų krūvininkų – elektronų ir skylių – poros. Taip spinduliavimo srautu Φ_e yra valdoma kolektoriaus srovė I_C .

Atstojamojoje schemoje vaizduojama fototranzistorius kai kada parodomas kaip dvipolis tranzistorius, kurio bazės grandinėje įjungtas fotodiodas. Dažnai fototranzistoriaus bazė neturi išvado. Toks fototranzistorius vadinamas **dvigubu fotodiodu**.

Fototranzistoriaus **įėjimo charakteristika yra kolektoriaus srovės priklausomybė nuo apšvitos E_e (W/m^2): $I_C = f(E_e)$ (6.28 pav.)** arba nuo spinduliavimo srauto Φ_e (W). **Išėjimo charakteristika $I_C = f(U_{CE})$, kai $E_e = const$, yra panaši kaip dvipolio tranzistoriaus.**

Fototranzistoriai yra jautresni už fotodiodus, tačiau jų elektrinė inercija didesnė. Jie gali reaguoti į spinduliavimo signalus, kurių kیتimo dažnis yra mažesnis nei 300 kHz. Fototranzistorių spektrinio jautrumo charakteristikos yra tokios pat kaip ir fotodiodų.

6.3.4. Optinė pora. Ji sudaroma iš diodo, spinduliuojančio optinį spektrą, ir tam spinduliavimui jautraus elemento (fotorezistoriaus, fotodiodo ar fototranzistoriaus) viename korpuse (6.29 pav.). Įėjimo elektrinis signalas paverčiamas optiniu. Pastarasis, patekęs į spinduliavimui jautrą elementą, vėl paverčiamas elektriniu išėjimo signalu. Optinės poros naudojamos tokiose grandinėse, kur yra neleistinas tiesioginis elektrinis ryšys.

Svarbiausias optinės poros parametras yra **srovės perdavimo koeficientas**

$$\alpha = I_{ex} / I_{in}; \quad (6.4)$$

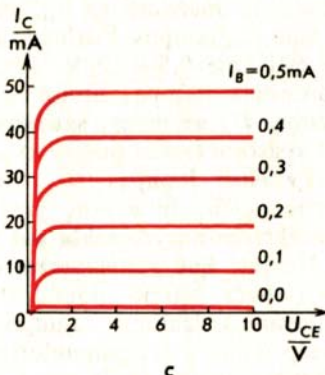
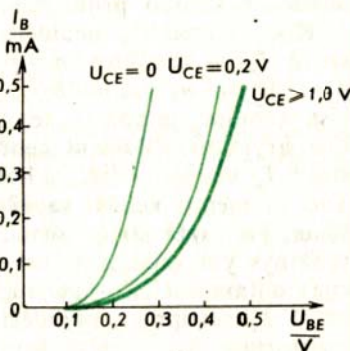
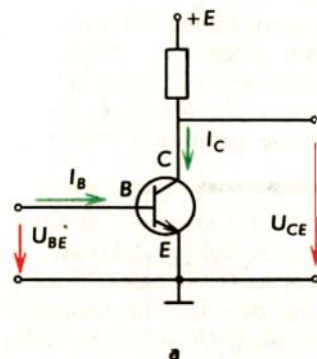
čia I_{ex} ir I_{in} – išėjimo ir įėjimo srovės.

Diodinės optinės poros $\alpha \approx 0,001$, optiniai signalai gali kisti iki 10 MHz dažniu. Tranzistorinės optinės poros $\alpha \approx 0,3$, optiniai signalai gali kisti iki 0,3 MHz dažniu.

6.4

Tiristoriai

Tiristoriais vadinami puslaidininkiniai elementai, kuriuose yra trys ar daugiau $p-n$ sandūrų. Jie gali būti tik dviejose stabiliose būsenose: arba laidūs elektros srovei, arba nelaidūs. Šiuolaikinių tiristorių varža nelaidumo būsenoje yra ne mažiau kaip 100 M Ω , o laidumo būsenoje – ne



6.26 pav. Dvipolio tranzistoriaus bendro emiterio schema (a), įėjimo (b) ir išėjimo (c) charakteristikos

daugiau kaip 10Ω , todėl jie naudojami kaip elektrinių grandinių jungikliai. Šiuolaikiniai tiristoriai gali komutuoti grandines, kuriomis teka šimtų amperų srovės ir kurių įtampa yra šimtai ar tūkstančiai voltų. Jie naudojami galingose pramonės ir energetikos elektrinėse grandinėse.

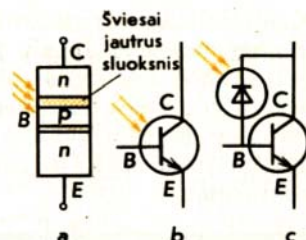
6.4.1. Diodinis tiristorius – dinistorius. Tai paprasčiausias dviejų elektrodų keturių sluoksnių nevaldomas tiristorius (6.30 pav.). Jame yra trys sandūros: p_1-n_1 , n_1-p_2 , p_2-n_2 . Dinistoriaus elektrodas, į kurį teka srovė iš išorinės grandinės, yra vadinamas anodu (A), o elektrodas, iš kurio teka srovė į išorinę grandinę, – katodu (K). Tarp anodo ir katodo prijungiama anodinė įtampa U_A .

Kol įtampa U_A nedidelė, dinistoriumi teka nedidelė srovė I_A – sandūros n_1-p_2 atgalinė srovė. Sandūros p_1-n_1 ir p_2-n_2 yra laidžios, jų varža maža, todėl beveik visa anodinė įtampa U_A tenka sandūrai n_1-p_2 jos atgaline kryptimi. Didinant anodinę įtampą U_A , dinistoriaus srovė I_A beveik nedidėja, kol įtampa pasiekia vertę U_{BO} . Tuo momentu nelaidi sandūra n_1-p_2 elektriškai pramušama, jos varža staiga sumažėja, o srovė I_A padidėja. Šis reiškinys yra vadinamas dinistoriaus perjungimu (komutacija), o įtampa U_{BO} – perjungimo įtampa. Perjungimo metu srovė I_A sustiprėja, padidėja įtampos kritimas apkrovos rezistoriuje R_L , dinistoriaus įtampa sumažėja. Rezistoriaus R_L varža parenkama tokia, kad grandinė tekėtų srovė, ne mažesnė už I_H , palaikančią dinistorių atviroje būsenoje. Įtampos kritimas atviraime dinistoriuje paprastai esti apie 0,5–1,0 V. Mažinant varžą R_L ar didinant maitinimo įtampą, atviro dinistoriaus srovė I_A didėja. Įtampą U_A atjungus, sandūros n_1-p_2 dielektrinės savybės vėl atsistato (varža padidėja) per 10–20 μs .

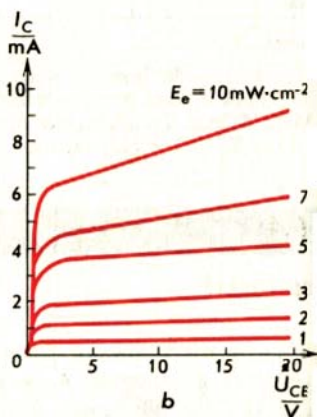
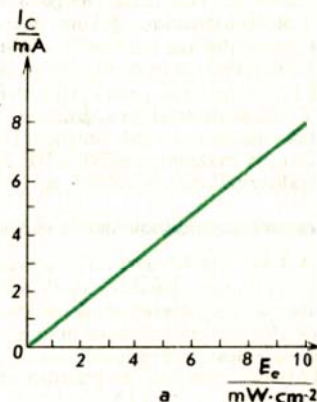
Pakeitus įtampą U_A poliarumą, dinistoriaus sandūros p_1-n_1 ir p_2-n_2 yra nelaidžios. Jo voltamperinė charakteristika yra tokia pat kaip diodo atgaline kryptimi.

Norint, kad voltamperinė charakteristika būtų simetriška (srovės kitimo pobūdis nepriklausytų nuo įtampos poliarumo), galima sujungti du dinistorius lygiagrečiai priešpriešiais arba panaudoti specialų simetrinį diodinį tiristorių – diaką (6.31 pav.).

6.4.2. Triodinis tiristorius – trinistorius. Tai tiristorius, turintis valdymo elektrodą (G), kuris gali būti p valdymo (prijungtas prie sluoksnio p_2) arba n valdymo (prijungtas prie sluoksnio n_1) (6.32 pav.). (Trinistorių galima vadinti tiesiog tiristoriumi, jei iš teksto ar schemų aišku, kad kalbama apie trinistorių.)



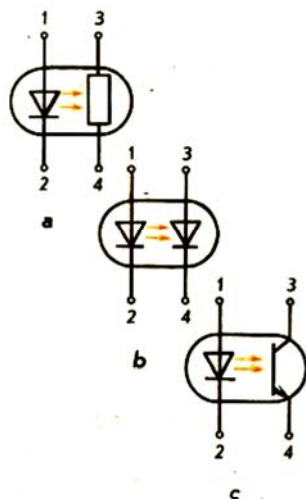
6.27 pav. Fototranzistoriaus sandara (a), sutartinis ženklas (b), atstojamoji schema (c)



6.28 pav. Fototranzistoriaus įėjimo (a) ir išėjimo (b) charakteristika

Kol valdymo signalo nėra ($I_G=0$), tristoriaus voltamperinė charakteristika yra tokia pat kaip dinistoriaus. Kai valdymo grandinė teka silpna srovė I_G ar prijungiamas srovės impulsas, į p_1 ar n_1 sluoksnį įvedami papildomi krūvininkai. Dėl to sandūros n_1-p_2 atgalinė pramušimo įtampa sumažėja. Priklausomai nuo I_G vertės, artimos 1 V. Pažymėtina, kad valdymo signalu tristorių galima priversti atsiverti, bet atviram tristoriui valdymo signalas jokios įtakos nebeturi. Pervesti tristorių į nelaidžią būseną galima, tiksliai sumažinus anodinę srovę iki vertės $I_A < I_H$ arba atjungus anodinę įtampą U_A . Po to sandūros n_1-p_2 dielektrinės savybės atsistato per 10–20 μs , o specialiosios paskirties tristoriuose – per dar trumpesnę laiką.

Simetriškai voltamperinei charakteristikai gauti du tristoriai sujungiami lygiagrečiai priešpriešiais arba naudojamas specialus simetriškas tristorius – triakas (simistorius) (6.33 pav.). Jie taikomi kintamosios srovės grandinėse kaip jungikliai ir valdomuosiuose lygintuvuose išėjimo įtampai reguliuoti.



6.29 pav. Optinės poros su rezistoriumi (a), fotodiodu (b), fototranzistoriumi (c)

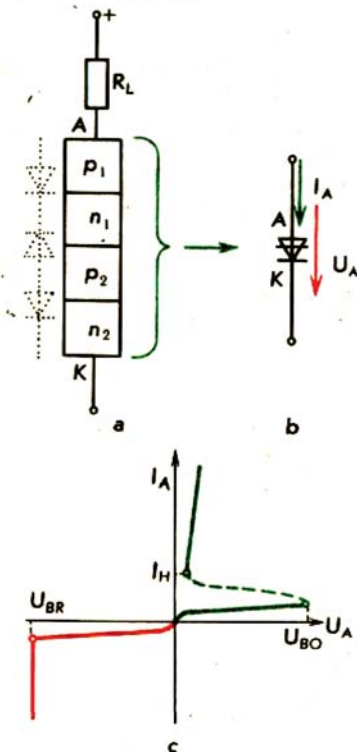
Integrinės mikroschemos

Tai šiuolaikinės mikroelektronikos gaminiai, skirti pakeisti signalui ar informacijai kaupti. Integrinės mikroschemos (ar tiesiog mikroschemos) yra sudarytos iš daugelio miniatiūrinių elementų ar jų grupių (komponentų), kurie atlieka elektronikos elementų (rezistorių, kondensatorių, diodų, tranzistorių) ar jų grupių funkcijas. Mikroschemai ir jos komponentams būdinga tai, kad jų elementai visi kartu sudaro nedalomą visumą; kiekvienas iš jų negali būti naudojamas kaip atskiras vienetas.

Mikroschemos sanglaudos tankį nusako elementų skaičius, tenkantis jos tūrio vienetui. Mikroschemos sudėtingumas apibūdinamas jos integracijos laipsniu K . Šis dydis rodo mikroschemoje esančių elementų skaičių N , kuris apskaičiuojamas šitaip:

$$N = 10^K. \quad (6.5)$$

Nurodant integracijos laipsnį K , apskaičiuota jo vertė paprastai suapvalinama iki didesnio sveikąjo skaičiaus. Gali būti pirmojo, antrojo, trečiojo ir t. t. integracijos laipsnių mikroschemos. Pavyzdžiui, trečiojo integracijos



6.30 pav. Dinistoriaus sandara (a), sutartinis ženklas (b) ir voltamperinė charakteristika (c)

laipsnio mikroschemoje yra daugiau kaip 100, bet ne daugiau kaip 1000 elementų. Tobulėjant mikroschemų gamybos technologijai, jų sanglaudos tankis ir integracijos laipsnis gana sparčiai didėja.

Integrines mikroschemas galima suskirstyti į sluoksnines, puslaidininkines ir hibridines.

6.5.1. Sluoksninės mikroschemos. Jų technologijos esmė yra ta, kad **elektronikos elementai sudaromi iš metalo sluoksnii dielektriško paviršiuje.** Ploni (apie $0,5-1,0 \mu\text{m}$) sluoksniai yra gaunami garinant metalus vakuume. Ant pagrindo uždedamas trafaretas su reikiamos formos laidžių takelių išpjovomis (apie $100-200 \mu\text{m}$ pločio). Laidininko garai pro trafareto išpjovas padengia dielektriką ir sudaro būsimosios sluoksninės mikroschemos elementus.

Sluoksniniai rezistoriai (6.34 pav.) yra gaminami iš chromo, nichromo, tantalio. Kuo didesnė rezistoriaus varža, tuo laidžiojo sluoksnio ilgis turi būti didesnis, o skerspjūvis mažesnis. Jeigu varža turi būti gana didelė (megaomų eilės), yra naudojami metalo ir dielektriško mišiniai (pavyzdžiui, chromo ir silicio monoksido).

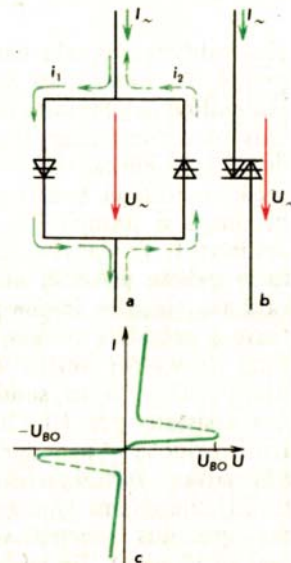
Sluoksninio kondensatoriaus sandara parodyta 6.35 pav. Dielektrinis pagrindas padengiamas pirmu laidžiuoju sluoksniu. Tai – pirmasis kondensatoriaus elektrodas. Po to dengiamas dielektrinės medžiagos sluoksnis ir kitas laidusis sluoksnis – antrasis kondensatoriaus elektrodas. Kondensatoriaus elektrodai gaminami garinant varį, aliuminį, sidabrą, auksą. Dielektrikas tarp kondensatoriaus elektrodų gali būti aliuminio silikatas, bario titanatas, titano oksidas ir kt. Sluoksniniai kondensatoriai gaminami iki dešimčių tūkstančių pikofaradų talpos.

6.5.2. Puslaidininkinės mikroschemos. Jos sudaromos viename puslaidininkinio kristale. Jo dalys naudojamos kaip rezistoriai, o iš $p-n$ sandūrų sudaromi kondensatoriai, diodai, tranzistoriai.

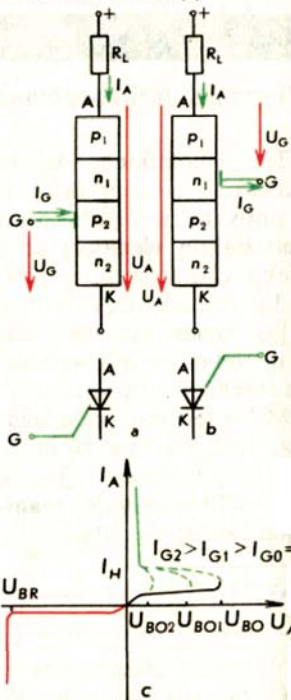
Puslaidininkinio rezistoriaus varža priklauso nuo jo matmenų ir specifinės varžos (nuo priemaišų). Paprastai puslaidininkinių rezistorių varža esti iki keleto kiloomų.

Kondensatoriai sudaromi panaudojant $p-n$ sandūrą, kuri turi talpą atgaline kryptimi. Ši talpa nėra didelė: nuo 50 iki 500 pF. Viena $p-n$ sandūra mikroschemoje sudaro diodą, o dvi – dvipolį tranzistorių.

6.36 pav. pavaizduota puslaidininkinė mikroschema, kurios pagrindą sudaro p tipo puslaidininkis. Į jį būsimųjų



6.31 pav. Du lygiagrečiai sujungti dinistoriai (a), diako sutartinis ženklas (b), simetriška voltamperinė charakteristika (c)



6.32 pav. Trinzistoriaus sandara ir sutartinis ženklas (a, b), voltamperinė charakteristika (c)

elementų vietose įterpiamos donorinės priemaišos, todėl susidaro $p-n$ sandūros, atskiriančios elementus nuo pagrindo. Kondensatorių sudaro dielektriko (SiO_2) sluoksnis ir du „elektrodai“, kurių vienas yra gausiai donorinėmis priemaišomis legiruotas (n^+) puslaidininkis. Mikroschemos elemento – tranzistoriaus – ženklas apskritimu neapvedamas.

Puslaidininkinių mikroschemų technologija labai paprasta, jos kompaktiškos ir labai patikimos. Pavyzdžiui, mikroschema, kurioje yra $10^7 - 10^8$ elementų, gali veikti nesutrikdama net $10^6 - 10^8$ h.

Puslaidininkinės mikroschemos yra greitaveikės: gali veikti, kai signalų dažnis siekia 1000 MHz. Tai paaiškina dideliu jų sanglaudos tankiu: tarp atskirų elementų atstumai nedideli, todėl laidininkų induktyvumas nedidelis, o mažo ploto $p-n$ sandūrų talpa taip pat esti maža. Puslaidininkinių mikroschemų nuostolių galia yra nedidelė, bet prie jų galima prijungti tik mažos galios imtuvus.

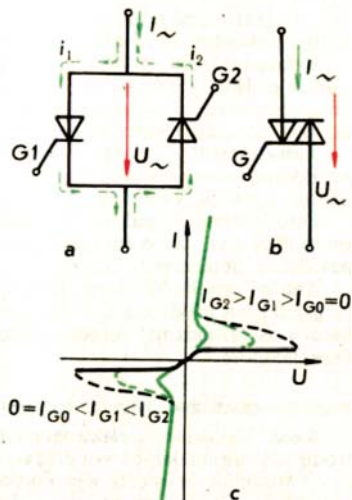
6.5.3. Hibridinės mikroschemos. Jos sudaromos iš sluoksninių mikroschemų komponentų, prie kurių dar prijungiami bekorpusiai diodai, tranzistoriai ir kiti miniatiūriniai elementai (droseliai, transformatoriai, didesnės talpos kondensatoriai), kuriuos neįmanoma ar keblu suformuoti iš sluoksninių. Papildomi elementai prijungiami prie sluoksninės mikroschemos plonais ($30 - 50 \mu\text{m}$ skersmens) laidininkais arba standžiai su ja sujungiami rutuliniais suvirinamais kontaktais.

6.6

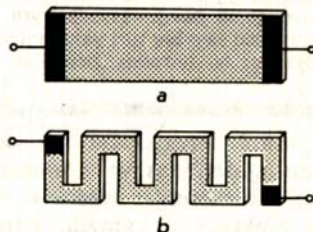
Vakuuminiai elektronikos elementai

Vakuuminiai yra tokie elektronikos elementai, kuriuose **elektros srovė teka** dėl to, kad elektronai, veikiami elektrinio lauko, juda **vakuume**. Vakuuminės lempos tebeaudojamos televizoriuose, elektroniniuose matavimo prietaisuose, radijo siųstuvuose ir kt. Elektroninis vamzdis plačiai taikomas oscilografuose, radiolokatoriuose, televizoriuose (kineskopas), kompiuteriuose (monitorius). Šviesos matavimams bei automatikoje naudojami vakuuminiai fotoelementai ir ypač fotodaugintuvai.

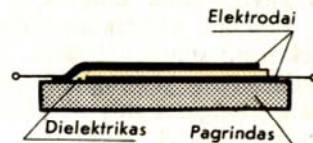
6.6.1. Elektronų emisija. Tam, kad elektronai galėtų išlėkti iš kūno, jiems reikia suteikti papildomos energijos. Priklausomai nuo suteiktos energijos rūšies emisija esti: a) termoelektroninė (šiluminė),



6.33 pav. Du lygiagrečiai sujungti trinistoriai (a), triako sutartinis ženklas (b), simetriška voltamperinė charakteristika (c)



6.34 pav. Mažos (a) ir didelės (b) varžos sluoksniniai rezistorius



6.35 pav. Sluoksninis kondensatorius

b) autoelektroninė (elektrostatinė), c) fotoelektroninė, d) antrinė (paviršius apšaudomas kitais krūvininkais).

Vakuuminiuose prietaisuose dažniausiai naudojama **termoelektroninė emisija**, kai katodui papildoma energija yra suteikiama, jį kaitinant (dažniausiai – netiesiogiai). Kuo aukštesnė katodo temperatūra, tuo daugiau elektronų emituoja katodas.

Autoelektroninė emisija vyksta tada, kai katodo elektronai gauna papildomos energijos iš išorinio elektrinio lauko. Tokie katodai nekaitinami, todėl jie vadinami šaltisiais katodais.

Fotoelektroninė emisija gaunama, kai fotokatodą veikia optinis spinduliavimas, kurio energijos pakanka, kad elektronai galėtų įveikti paviršiaus potencialinį barjerą.

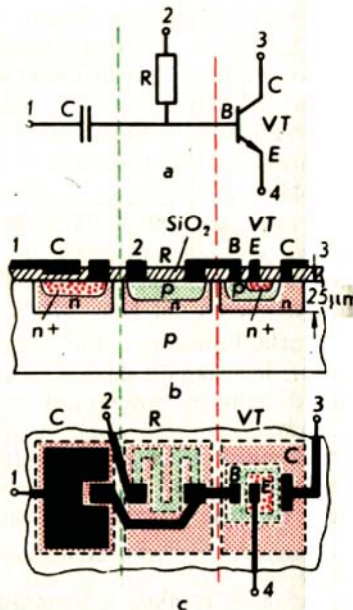
Antrinė emisija susidaro, katodą apšaudant sunkiaisiais jonais arba greitaisiais elektronais. Tokia emisija yra naudojama papildomiesiems katodams (dinodams) fotodaugintuvuose bei specialiosiose vakuuminėse lempos.

6.6.2. Vakuuminės elektroninės lempos. Paprasčiausia dviejų elektrodų vakuuminė lempa yra diodas, sudarytas iš katodo ir anodo (6.37 pav.) stiklinėje ar metalinėje kolboje, kurioje slėgis yra apie 10^{-4} – 10^{-6} Pa. Diodas yra netiesinis elementas. Jis laidus srovei tiesiogine kryptimi ir nelaidus atgaline. Vakuuminio diodo atgalinė srovė yra daug mažesnė už puslaidininkinio.

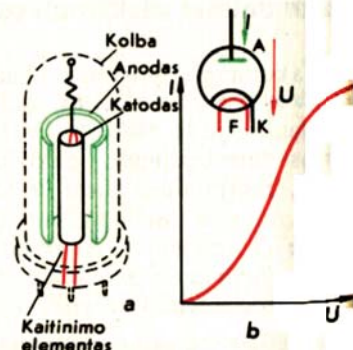
Triodas yra trijų elektrodų vakuuminė lempa, kurios trečiasis elektrodas, vadinamas tinkleliu, įtaisomas greta katodo. Esant tokiai konstrukcijai, labai mažas neigiamas tinklelio potencialas užveria elektronams kelią į anodą. Keičiant tinklelio potencialą, galima valdyti triodo srovę (6.38 pav.). Triodas yra stiprinimo elementas. Dar geresnių stiprinimo savybių turi vakuuminės lempos, kuriose yra du ar daugiau tinklelių: tai triodas, pentodas ir kt.

6.6.3. Elektroninis vamzdis. Elektroninis vamzdis yra gana sudėtingas vakuuminis elektroninis prietaisas, kuriam **sukuriamas ir valdomas elektronų spindulys**. Paprasčiausią elektroninį vamzdį, kuris naudojamas vieno spindulio oscilografuose (žr. 8.5.2), sudaro **elektronų prožektorius**, emituojantis elektronus bei formuojantis jų spindulį, ir **spindulio valdymo sistema** (6.39 pav.). Visa tai yra patalpinta į stiklinį vamzdį, kurio platesnis galas yra **ekranas**, iš vidaus padengtas liuminoforu. Elektroninio vamzdžio viduje dujų slėgis yra apie 10^{-8} – 10^{-6} Pa.

Elektroninio vamzdžio **katodas K** yra tuščiaviduris cilindras, kurio galo išorinis paviršius padengtas **elektronų emituojančiu oksidiniu sluoksniu**. Katodas yra kitame tuščiaviduriame cilindre – **moduliatoriuje M**, kuris yra ir **valdymo elektrodas**. Moduliatoriaus gale yra skylutė elektronų spinduliui išeiti. Per įtampos dalytuvą prie moduliatoriaus prijungiamas keletas dešimčių voltų potencialas, neigiamesnis už katodo potencialą. **Šiuo potencialu (rezistoriaus R_1 slankikliu) reguliuojamas pro moduliatorių sklindantis elektronų spindulys, tuo pačiu ir elektronų pėsako skaitis ekrane**. Be to, moduliatorius dar atlieka pirmojo elektroninio lęšio vaidmenį, fokusuodamas ele-



6.36 pav. Puslaidininkinės integrinės mikroschemos elektrinė schema (a), pjūvis (b) ir vaizdas iš viršaus (c)



6.37 pav. Vakuuminio diodo sandara (a), sutartinis ženklas ir voltamperinė charakteristika (b)

ktronų spindulį tarp katodo ir modulatoriaus išėjimo angos.

Elektronų greitinimui ir tolesniam spindulio fokusavimui skirti du anodai $A1$ ir $A2$. Tai plonasieniai cilindrai, prie kurių prijungtas didelis (anodo $A2$) ir kiek mažesnis reguliuojamas (anodo $A1$) teigiamas potencialas. Dėl to anodai traukia elektronus. Elektronai stipriame elektriniame lauke greitėja ir išlekia pro anodų galuose esančias skylutes – diafragmas. Anodų konstrukcija yra tokia, kad jų elektrinis laukas ne tik elektronus greitintų, bet ir formuotų juos į ploną spindulį, t. y. sufokusuotų. Elektrinis laukas formuoja elektronų spindulį panašiai kaip optiniai lęšiai šviesos spindulį. Dėl to visa ši elektroninio vamzdžio dalis vadinama elektronine optine sistema.

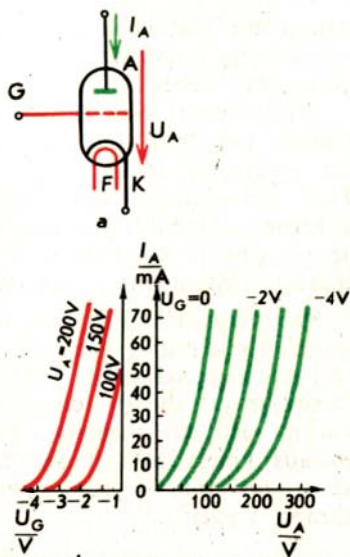
Elektronų spindulį galima nukreipti horizontalia ar vertikalia kryptimi, suteikiant reikiamo poliarumo ir didumo įtampą horizontalaus $X1 - X2$ ar vertikalios $Y1 - Y2$ kreipimo plokštėms.

Praejęs visą fokusavimo, greitinimo ir kreipimo sistemą, elektronų spindulys patenka į ekraną E . Ekranas iš vidaus yra padengtas liumoforu, kuris švyti nuo elektronų smūgių. Elektroninio vamzdžio vidinės sienelės ties ekranu padengtos laidžios elektros srovei medžiagos – metalo ar grafito – sluoksniu. (Grafito danga vadinama akvadagu.) Šis sluoksnis, sujungtas su anodu $A2$, grąžina elektronų perteklių iš ekrano į anodą. Taip panaikinamas didelis neigiamas ekrano potencialas ir pašaliniių elektrinių laukų įtaka. Nuo magnetinių laukų elektroninis vamzdis iš išorės apsaugomas minkštamagnetės medžiagos (pavyzdžiui, permalojaus) ekranu.

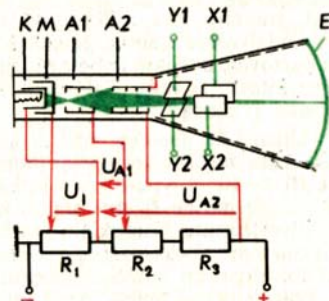
Vienas svarbiausių elektroninio vamzdžio parametrų yra jo jautrumas S (mm/V). Tai atstumo, kuriuo nukreipiamas elektronų spindulys ekranė, santykis su kreipimo plokštelių potencialų skirtumu. Jautrumas horizontaliąja ir vertikaliąja kryptimi S_x ir S_y gali būti skirtingas.

Svarbi ekrano savybė yra jo spalva. Jeigu elektroninis vamzdis yra skirtas oscilografui ar displėjui, kurio ekraną reikia stebėti, parenkamas žaliai švytintis liumoforas, nes akis yra jautriausia žaliai šviesai. Jeigu ekraną reikia fotografuoti, jis padengiamas liumoforu, švytinčiu mėlynai arba žydrai, nes šiai spalvai yra jautriausios fotografinės medžiagos. Nespaltoto televizoriaus ekrano spalva pageidautina neutrali.

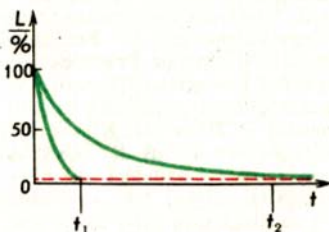
Ekranu liumoforas turi tam tikrą inerciją – dar šiek tiek laiko švyti po to, kai į jį jau nebepatenka elektronų spindulys (6.40 pav.). Ši ekrano savybė apibūdinama pošvyčio laiku, per kurį spindulio pėdsako skaištis sumažėja iki 1 % nuo pradinės skaiščio vertės. Įvairių liumoforų ekranų pošvytis būna nuo 10^{-5} iki 15 s. Kai reikia



6.38 pav. Vakuuminio triodo sutartinis ženklas (a), perdavimo (b) ir išėjimo (c) charakteristikos



6.39 pav. Elektroninio vamzdžio sandara ir jo elementų prijungimo schema



6.40 pav. Įvairių liumoforų skaiščio priklausomybė nuo laiko, nutraukus elektroninio spindulio poveikį

stebėti lėtai kintančius procesus, patogiau naudotis ekranu, turinčiu ilgą pošvytį, tačiau jis nėra patogus didelės spartos procesams stebėti.

Priklausomai nuo elektroninio vamzdžio paskirties jo sandara gali būti skirtinga. Pavyzdžiui, televizoriams reikia elektronų spindulį nukreipti labai dideliu kampu. Tam geriau tinka **magnetinė kreipimo sistema**, kurioje elektronų spindulys yra kreipiamas elektromagnetu. Magnetinė sistema pasižymi didesne inercija ir netinka sekti sparčiai kintantiems procesams.

Kai reikia stebėti iš karto kelis elektrinius dydžius, naudojami oscilografai, turintys daugiau (nuo dviejų iki penkių) elektronų spindulių. Tokio oscilografo elektriniame vamzdyje yra dvi (ar daugiau) elektronų spindulio kūrimo ir valdymo sistemos. Panašūs yra spalvoto televizoriaus kineskopai: juose yra trys elektronų spinduliai, kurie priverčia švytėti skirtingomis spalvomis įvairias ekrano vietas.

6.6.4. Fotoelementas ir fotodaugintuvas. Vakuuminio fotoelemento (6.41 pav.) anodas *A* yra stiklinėje kolboje. Katodas *K* – kolbos vidinio paviršiaus dalis, padengta plonu cezio, stibio, sidabro ar kitos spinduliavimui jautrios medžiagos sluoksniu. Kai anodinė įtampa pastovi, grandine tekanti fotosrovė I_{Φ} yra tiesiog proporcinga šviesos ar spinduliavimo srautui, patenkančiam į katodą. Kai šviesos srautas yra pastovus, didinant anodinę įtampą, fotosrovė stiprėja, kol pasiekia soties fotosrovės vertę. Tai reiškia, kad visi iš katodo išlėkę elektronai patenka į anodą.

Vakuuminiai fotoelementai, lyginant su fotorezistoriais, pasižymi labai maža tamsine srove: kai įtampa yra apie 100 V, tamsinė srovė yra 10^{-9} – 10^{-12} A. Jie yra labai inertiški – fotosrovė spėja sekti iki 10^9 Hz dažnio šviesos srauto kitimą.

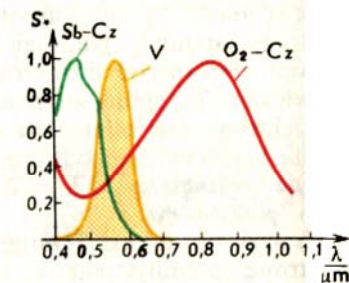
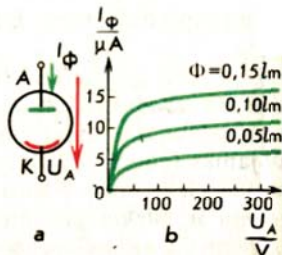
Fotoelementų santykinio spektrinio jautrumo charakteristikos priklauso nuo fotokatodo medžiagos bei jame esančių priemaišų, taip pat fotoelemento langelio spektrinio pralaidumo.

Fotoelementai apibūdinami integraliniu jautrumu šviesai S_v (esti nuo 20 iki 250 $\mu\text{A}/\text{lm}$) ar optinio spinduliavimo srautui S_e (esti nuo 0,1 iki 50 mA/W).

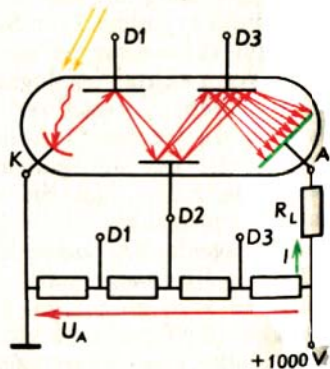
Fotodaugintuvų veikimo principas panašus kaip vakuuminių fotoelementų, tik juose iš fotokatodo emituotus elektronus pritraukia ne anodas, o tarpinis elektrodas, vadinamas **dinodu** (6.42 pav.). Dinodui būdinga antrinė emisija. Fotodaugintuve gali būti ne vienas, o keli (esti iki 14) dinodai. Prie kiekvieno dinodo prijungiamas vis didesnis teigiamas potencialas. Iš pirmojo dinodo *D1* išmuštus elektronus pritraukia didesnį potencialą turintis tolesnis dinodas *D2*, iš pastarojo išmuštus – *D3* ir t. t. Kiekvieno tolesnio dinodo elektronų skaičius padidėja 3–6 kartus. Kol elektronai pasiekia anodą, jų skaičius (fotosrovė) žymiai padidėja (iki 10^6 – 10^7 kartų). Tuo būdu fotodaugintuvas yra tam tikras fotokatodo emituotų elektronų srovės stiprintuvas.

Fotodaugintuvų jautrumas yra žymiai didesnis už fotoelementų. Jų jautrumas šviesai yra nuo 1 iki 1000 A/lm, todėl fotodaugintuvais galima matuoti labai silpnus šviesos srautus (10^{-9} – 10^{-13} lm). Fotodaugintuvų voltamperinės ir spektrinio jautrumo charakteristikos yra panašios į vakuuminių fotoelementų charakteristikas.

Fotodaugintuvų maitinimui reikalinga aukšta įtampa: nuo 220 iki



6.41 pav. Vakuuminio fotoelemento sutartinis ženklas (a), voltamperinės (b) ir santykinio spektrinio jautrumo (c) charakteristikos: Sb–Cz ir O₂–Cz – fotoelementų su stibio-cezio ir deguonies-cezio katodais; V – žmogaus akies



6.42 pav. Fotodaugintuvas ir jo elektrinė jungimo schema

2500 V. Kuo daugiau dinodų, tuo ji turi būti didesnė. Kadangi foto-daugintuvo srovė labai priklauso nuo anodinės įtampos, tai dažniausiai foto-daugintuvai jungiami prie stabilizuotos įtampos šaltinio.

6.7

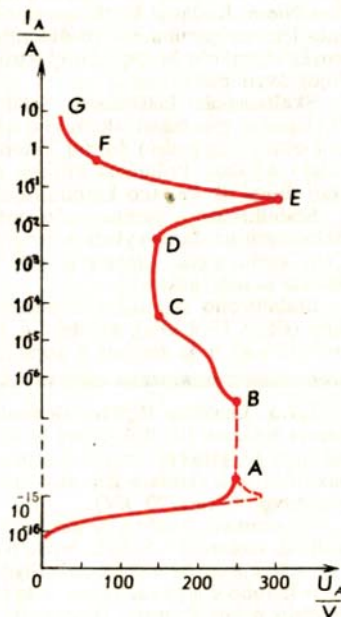
Joniniai reiškiniai ir joniniai elektronikos elementai

Joniniais elektronikos elementais vadinami tokie, kuriuose krūvininkai yra jonai ir elektronai, elektrinio lauko veikiami judantys jonizuotomis dujomis. Jie yra sudaryti iš dviejų ar daugiau elektrodų, įtaisytų stiklinėje, kvarcinėje ar kitos medžiagos kolboje, kuri užpildoma inertinėmis dujomis, vandeniliu arba kai kurių metalų (dažniausiai gyvsidabrio) garais. Kolbos viduje slėgis būna nuo 0,1 iki 1000 Pa. Dujų užpildas ir jų slėgis, kolbos medžiaga ir jos forma, elektrodai ir jų išdėstymas parenkami atsižvelgiant į joninio elemento paskirtį.

Joniniai elektronikos elementai yra naudojami šviesinei indikacijai, įtampai stabilizuoti, elektrotechnologiniams tikslams.

6.7.1. Dujinis išlydis. Dujose yra mažai krūvininkų, todėl jos paprastai nėra laidžios elektros srovei ir laikomos geru dielektriku. Suskaidžius dujų atomus į elektronus ir teigiamus jonus, t. y. jas jonizavus, dujos pasidaro laidžios elektros srovei. Dujas galima jonizuoti stipriu elektrinio lauku, aukšta temperatūra, radiacija (radioaktyviais, kosminiais, šviesos ar kitokiais spinduliais). Nuolat jonizuojamose dujose kartu vyksta ir priešingas procesas – rekombinacija, kurios metu dalis elektronų susijungia su jonais ir vėl virsta atomais. Tekant srovei dujomis, jonizacijos ir rekombinacijos procesai nusistovi, gaunama jų pusiausvyra. Išjungus įtampą, jonizacijos procesas nutrūksta. Rekombinacija įvyksta per dešimtąsias milisekundės dalis.

Svarbiausias dujinio išlydžio savybes apibūdina jo voltamperinė charakteristika (6.43 pav.). Kol anodinė įtampa U_A palyginti nedidelė, dujomis teka labai silpna srovė (charakteristikos dalis – atkarpa OA). Šią srovę sudaro laisvieji elektronai, kurie atsiranda dėl to, kad dujas šiek tiek jonizuoja šviesa, natūrali radiacija ar kiti veiksniai, taip pat vykstanti antrinė katodo emisija. Kadangi krūvininkų koncentracija labai maža, tai, dar padidinus įtampą, srovė stiprėja (atkarpa – AB) tol, kol visi elektronai patenka į anodą.



6.43 pav. Dujinio išlydžio voltamperinė charakteristika

Toliau didinant anodinę įtampą, elektronai tiek pagreitunami, kad jie, susidurdami su dujų atomais, pajėgia juos jonizuoti. Prasideda **smūginė jonizacija** (atkarpa *BC*), dėl kurios atsiranda nauji laisvieji elektronai, vadinami antriniais. Kartu atsiradusieji didelės masės teigiami jonai, atsitrenkdami į katodą, išmuša iš jo papildomų elektronų. Dujose užsidega normalus **rusenantysis išlydis** (atkarpa *CD*). **Jonizuotos dujos, esančios netoli katodo, švyti.**

Dar padidinus įtampą, jonų skaičius ir jų energija tiek padidėja, kad jie pajėgia įkaitinti katodą iki termoemisiškai reikalingos temperatūros (atkarpa *EF*). **Kai termoemisiuja yra pakankama, dujose užsidega lankinis išlydis (FG). Dujos, esančios tarp anodo ir katodo, švyti visu tūriu.**

Lankiniam išlydžiui būdingos stiprios (iki šimtų amperų) srovės. Jo metu dujų varža esti labai maža ir, srovei stiprėjant, dar mažėja. Tai reiškia, kad **dujinio išlydžio elementus į pagrindinę grandinę galima jungti tikrai kartu su srove ribojančiais įtaisais.**

6.7.2. Rusenančiojo išlydžio elementai. Signalinė (neoninė) lempa – tai joninis prietaisas, skirtas šviesinei elektrinių signalų indikacijai. Jų stiklinėse kolbose gali būti įvairių formų elektrodai. Kolbos užpildomos inertinėmis dujomis, nuo kurių sudėties priklauso lempos šviesos spalva. Neonas švyti rausvai, neono, helio ir argono mišiniai – oranžine šviesa. Kadangi švyti dujos prie katodo, nuolatinės srovės signalinės lempos gaminamos su didesniu katodo paviršiumi. Kintamosios srovės signalinių lempų abu elektrodai vienodi, jų aplinkoje esančios dujos švyti pakaitomis.

Skaitmeniniai indikatoriai – tai specialios signalinės lempos, kurių katodai gaminami skaitmenų ar raidės formos. Viename korpuse gali būti daug įvairių formų katodų ir vienas bendras tinklelio pavidalo anodas. Prijungus kuriam nors katodui neigiamą potencialą, švyti dujos tik ties tuo katodu, indikuodamos jo formos ženklą.

Stabilitronas – joninis elementas, naudojamas kaip įtampos stabilizatorius. Jame vyksta rusenantysis išlydis (žr. 6.43 pav., atkarpa *CD*), kurio metu, kintant srovei, įtampa tarp stabilitrono elektrodų **kliekia beveik pastovi.**

Stabilitrono stiklinėje ar metalo keramikos kolboje yra inertinių dujų (slėgis 1–4 kPa), anodas *A* ir katodas *K*. Stabilitronų darbo srovė 5–40 mA, nuolatinė stabilizuojama įtampa – 60–150 V.

6.7.3. Lankinio išlydžio elementai. Gazotronas yra joninis nevaldomas lankinio išlydžio dviejų elektrodų diodas. Juo srovė gali tekėti tik viena kryptimi (iš anodo į katodą), kai įtampa tarp jo elektrodų yra pakankama lankiniam išlydžiui sukelti. Naudojami aukštos įtampos lygtuvuose (iki 70 kV).

Tiratronas panašios konstrukcijos kaip gazotronas, bet jame yra trečiasis elektrodas. Šio elektrodo potencialu valdomas lankinio išlydžio atsiradimo momentas. Lankinis išlydis trunka tol, kol įtampa tarp anodo ir katodo yra pakankama, ir jo trukmė nuo valdymo elektrodo potencialo nebeprisklaido. Tiratronai naudojami galinguose valdomuose kintamosios įtampos lygtuvuose.

Pastaruosiu metu gazotronus ir tiratronus pakeičia galingi puslaidininkiniai dinistoriai ir trinistoriai.

Kontroliniai klausimai ir užduotys

6.1. Paašškinkite, kas tai yra:

- fizikinė, techninė elektronika, mikroelektronika;
- elektronikos elementas;
- puslaidininkinis rezistorius;
- $p-n$ sandūra, diodas;
- tiesioginė, atgalinė įtampa, didžiausia leistina atgalinė įtampa;
- lauko, dvipolis tranzistorius;
- tiristorius, dinistorius, trinistorius;
- integrinė mikroschema, sanglaudos tankis;
- elektroninis vamzdis.

6.2. Kuo ypatingas puslaidininkų laidumas elektros srovei palyginti su laidininkų laidumu? Kas yra elektroninis ir skylinis laidumas?

6.3. Kokią įtaką puslaidininkų laidumui turi priemaišos? Kodėl? Kokios jos esti?

6.4. Kokie reiškiniai vyksta $p-n$ sandūroje, kai prijungiame prie jos $p-n$ sričių šitokius potencialus: a – prie p – teigiamą, prie n – neigiamą; b – prie n – teigiamą, prie p – neigiamą?

6.5. Kokius žinote puslaidininkinius rezistorius? Kokios svarbiausios jų savybės ir charakteristikos?

6.6. Nubraižykite idealios ir realios $p-n$ sandūros voltamperines charakteristikas, paašškinkite jų būdingus taškus. Kuo pasireiškia elektrinis ir šiluminis $p-n$ sandūros pramušimas?

6.7. Kuo skiriasi Ge ir Si diodų elektriniai parametrai sprendžiant pagal jų voltamperines charakteristikas?

6.8. Nuo ko priklauso energijos nuostoliai lyginimo diode? Kaip jie šalinami? Ar pavojinga diodui srovė, daug stipresnė už vardinę?

6.9. Kokie yra specialiosios paskirties diodai? Kokios svarbiausios jų savybės ir charakteristikos?

6.10. Kokia lauko tranzistoriaus sandara? Koks jo veikimo principas? Koks laukas minimas jo pavadinime ir kodėl?

6.11. Nubraižykite lauko tranzistoriaus jungimo schemą ir svarbiausias charakteristikas. Paašškinkite kreivių pobūdį.

6.12. Kokia MDP ir MOP lauko tranzistorių sandara ir veikimo principas? Nubraižykite MOP tranzistoriaus jungimo schemą ir charakteristikas. Paašškinkite kreivių pobūdį.

6.13. Kuo panašūs ir kuo skiriasi sudaryti tik iš puslaidininkų lauko tranzistoriai ir MOP lauko tranzistoriai?

6.14. Kokia dvipolio tranzistoriaus sandara ir koks jo veikimo principas? Koks jo sutartinis ženklas?

6.15. Nubraižykite dvipolio tranzistoriaus jungimo schemą ir charakteristikas. Paašškinkite kreivių pobūdį. Kas yra srovės perdavimo koeficientas ir kokią tranzistoriaus savybę jis rodo?

6.16. Kokia dinistoriaus sandara ir koks jo veikimo principas? Koks dinistoriaus sutartinis ženklas? Nubraižykite dinistoriaus voltamperinę charakteristiką ir paašškinkite.

6.17. Kas yra diakas? Kokia jo paskirtis? Koks jo sutartinis ženklas? Nubraižykite diako voltamperinę charakteristiką ir paašškinkite.

6.18. Kokia trinistoriaus sandara? Koks jo veikimo principas? Koks sutartinis ženklas? Nubraižykite trinistoriaus voltamperinę charakteristiką ir paašškinkite.

6.19. Kas yra triakas? Kokia jo paskirtis? Koks jo sutartinis ženklas? Nubraižykite triako voltamperinę charakteristiką ir paašškinkite.

6.20. Kuo ypatingos integrinės mikroschemos? Koku parametru nusakomas jų elementų skaičius? Kaip sudaromi elementai?