

7. VÄLJATRANSISTORID

FieldEffect Transistor (FET)

7.1. Väljatransistori mõiste ja põhiligid

Väljatransistoriks nimetatakse pooljuhtseadist, mille pooljuhist voolu juhtiva kanali juhtivust mõjutab elektriväli ja sellest tulenevalt on ta erinevalt bipolaartransistorist pingega tüüritav element. Seda nimetatakse ka unipolaartransistoriks, kuna tema väljundvool kujuneb ainult ühenimelistest laengukandjate (kas elektronide või aukude) liikumisena. Tal on samuti kui bipolaartransistoril kolm elektroodi. Üht, voolujuhtiva kanali otsas asuvat elektroodi, kust laengukandjad sisenevad kanalis, nimetatakse lätteks (*source*), teist, kust laengukandjad väljuvad, neeluks (*drain*) ja kanali küljel asuvat tüürelektroodi paisuks (*gate*).

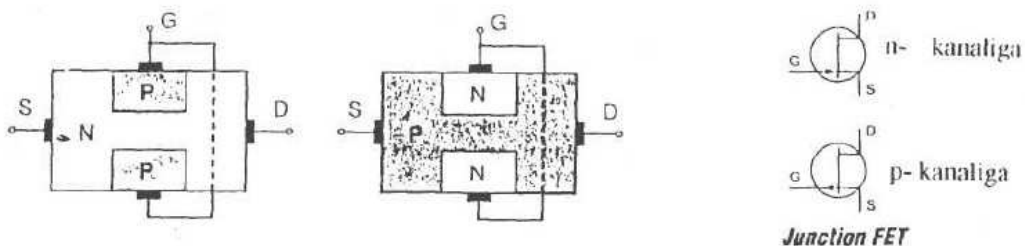
Konstruksioonilt jagunevad väljatransistorid p-n siirdega väljatransistorideks (JFET) ja isoleeritud paisuga ehk isoleerkihiga väljatransistorideks (ingliseelse terminoloogia järgi MOSFET, kus tähed MOS on tulnud konstruktsiooni skeemi st *Metal-Oxide-Semiconductor*).

Väljatransistoride eeliseks on eelkõige suurem sisendtakistus (kuna sisendvool on väga väike), väiksemad omamürad (kuna laengukandjad liiguvad kanalis elektrivälja kiirendaval toimel, s.o. mitte difusioonsest) ja väiksem temperatuurimõju (voolu moodustavad enamislaengukandjad, mille hulk ei sõltu oluliselt temperatuurist). Ka on väljatransistoridel tehnoloogilisi eeliseid just integraallülituste valmistamise seisukohalt.

7.2. p-n-siirdega väljatransistorid

Junction FET (JFET)

p-n-siirdega väljatransistor koosneb kas n- või p-juhtivusega kanalist, millega on ühendatud lätte- ja neelelektroodid ning selle küljel või külgedel paiknevast teistpidise juhtivusega paisutsoonist. Enamlevinud on n-kanaliga transistorid, kuna elektronide suuremast liikuvusest tulenevalt on nende sagedusomadused paremad. Taoliste väljatransistoride skemaatiline ehitus ja tingmärgid on toodud joonisel 7.1.



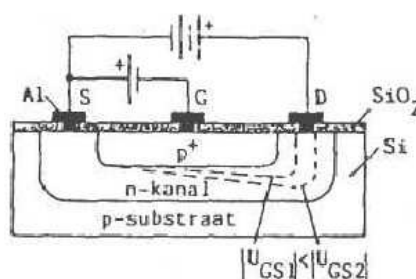
JOONIS 7.1.

Nagu alati eri juhtivusega pooljuhtide liitumiskohal, nii ka siin tekib paisu ja kanali vahel p-n-siire ja tõkkekiht. Sellise p-n-siirdega väljatransistori töötamiseks on vaja siirdele anda vastupinge. Mida suurem on vastupinge, seda laiem on tõkkekiht ja seda kitsamaks jääb juhtiv kanal ja nii hakkabki väljatransistori neeluvool sõltuma paisule antavast vastupingest. Paisuahelas tekitatud vahelduvpinge muutused aga põhjustavad ka väljundvoolu muutusi. Praktiliselt on kanali pikkuseks umbes 1 μm ja laiuks 0.5 μm . paksus aga kujundatakse sõltuvalt voolust. Oluliseks iseärasuseks on see, et paisutsoonide juhtivus on suurem kui kanali juhtivus (laengukandjate kontsentratsioon). Sellega saadakse tõkkekihi suurem laienemine kanali poole, ja

paisupinge tugevam tüüriv toime. Ka tuleb arvestada, et tõkkekiht ehk laengukandjatest vaesustatud tsoon on neelu pool laiem, kuna läte ja neelu vahelisest pingest tekib piki kanalit pingelang. Sellest tulenevalt on neelu pool siirdele mõjuv vastupinge suurem. Neeluvool on suurim, kui paisupinge on null ja see väheneb paisule antava negatiivse pinge suurenedes kuni transistori sulgumiseni. Sel juhul kulgeb läte ja neelu vahel mingi väga väike vool. Paisule pärisuunapinge andmisel tõkkekiht ja tüüriv toime kaovad.

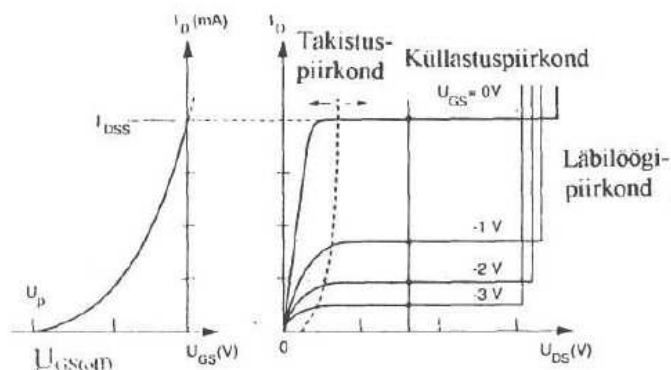
Kuna sisendpingeks olev paisupinge on sisuliselt p-n-siirde vastupinge, siis on ka paisu vool väga väike. See on siirde vastu vool.

Sageli kasutatakse väljatransistori ühepoolset ehitust, kuna teda saab valmistada ühepoolse tehnoloogiaga pooljuhtkristallile. Sellise transistori ehitus on toodud joonisel 7.2.



JOONIS 7.2.

Kuna väljatransistoril puudub praktiliselt sisendvool, saame läbi vähemate tunnusoontega. Neid on kaks: ülekandetunnusjoon $I_D = f(U_{DS})$, kui $U_{DS} = \text{const}$ ja väljundtunnusjoon $I_D = f(U_{DS})$, kui $U_{GS} = \text{const}$. Mõlemad nimetatud tunnusooned on toodud joonisel 7.3.



JOONIS 7.3.

Väljundtunnusjoontelt võib näha kolme iseloomulikku piirkonda. Väiksemate läte- ja neeluvaheliste pingete korral sõltub neeluvool tugevasti sellest pingest ja seda piirkonda nimetatakse takistuspiirkonnaks (*Voltage-controlled resistance region*), kuna selle piirkonna režiimides saab väljatransistori kasutada muudetava takistina. Mida negatiivsem on paisu pinge, seda väiksem on väljundtunnusjoone tõus ja seda suurema takistusena toimib transistor. See on seletatav sellega, et mida negatiivsem on pais seda laiem on tõkkekihi tsoon ja seda väiksem on juhtiva kanali ristlõige ning seda suurema takistusena toimib transistor.

Teine piirkond on küllastuspiirkond (*pinch-off region*), kus neeluvool sõltub küll paisupingest, kuid väga vähe läte ja neelu vahelisest pingest. Selle piirkonna režiimis

on väljatransistor kasutatav muutumatu voolu allikana. Lätte ja neelu vahelise pinge nõrk mõju neelu voolule seletub sellega, et suurematel pingetel on kanalis liikuvad elektronid saavutanud juba oma suurima kiiruse ja see ei saa enam suureneda ning vastavalt sellele ei suurene oluliselt ka enam neeluvool.

Kolmas on läbilöögiipiirkond (*breakdown region*), mis tekib suurematel lätte ja neelu vahelistel pingetel. Teatud pingest alates tekib järsk voolu suurenemine, mille põhjuseks on varemvaadeldud läbilööginähtused. Läbilöögi tagajärjel transistor reeglina hävib.

Nagu märgata, on ülekanDETUNNUSJOON mittelineaarne, kuid vähem kui bipolaarse transistori sisendtunnusjoon. See viitab väljatransistoride väiksematele moonutustele, mis on ka üheks väljatransistori eeliseks. Ülekandetunnusjoon on küllalt täpselt kirjeldatav ruutfunktsiooniga. Selle kaks punkti on alati käsiraamatutes antud. Paisu sulgepinge $U_{GS(off)}$ mis on paisu ja lätte vaheline pinge, mil transistor sulgub ($I_D = 0$) ja neeluvool, kui pais ja läte on lühistatud I_{DSS} . Kui need kaks punkti on teada, võime alati arvutada neeluvoolu etteantud paisu ja lätte vahelisel pingel valemiga

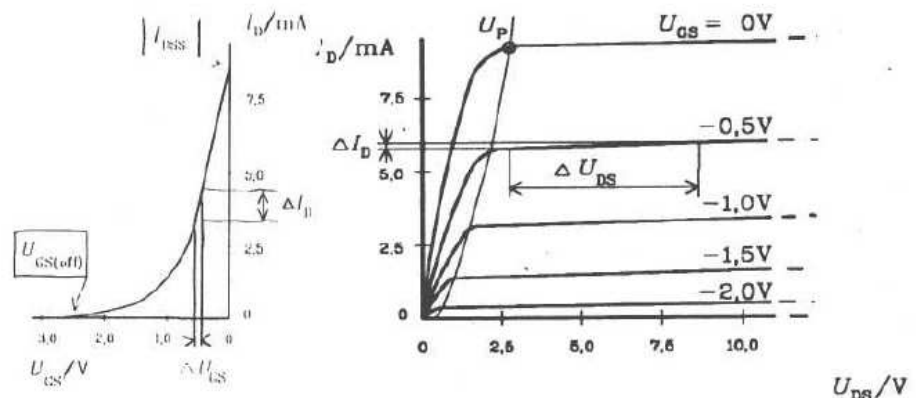
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2$$

Väljatransistoril on kaks tunnusjoontelt määratavat põhiparameetrit.

Ülekandetunnusjoonelt leiame tüüriivat toimet iseloomustava parameetrina ülekanDEJUHTIVUSE ehk tõusu (kasutatakse ka mõistet "läbivjuhtivus")

$$S = g_{fs} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

Kuna voolu ja pinge jagatis on juhtivus, siis mõõdetakse ka seda parameetrit juhtivuseühikutes. Vaadeldaval juhul on sobivaks mS. Ülekandetuhtivuse arvutamiseks vajalike voolu ja pinge muutusi saame leida tunnusjoonelt, nagu on näha joonisel 7.4.



JOONIS 7.4.

Väljundtunnusjoontelt määratavaks parameetriks on kanali juhtivus

$$g = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}}$$

Vastavate voolu ja pinge muutuste leidmine on samuti näidatud joonisel 7.

Tüüpiliseks kanali juhtivuse väärtuseks on 10....200 μS , mille vähim väärtus vastab takistusele 100 $\text{k}\Omega$. See näitab, et kanali takistus ja väljatransistori kui võimendi väljundtakistus on suur.

Lisaks eelpool toodud neljale väljatransistori parameetrile antakse piirparameetritena käsiraamatutes või andmelehtedel veel:

P_{DSmax} - suurim lubatav hajuvõimsus;

U_{DSmax} - suurim lubatav neelu ja läte vaheline pinge (kui pais ja läte on kokku ühendatud);

U_{GSmax} - suurim lubatav paisu ja läte vaheline pinge;

I_{Dmax} - suurim lubatav neeluvool;

IGF - suurim lubatav paisu vool päripinge olukorras. Tavalises, s.o. vastupingeolukorras esinev paisuvool ei ületa mõnda pikoamprit. Samas suurusjärgus on ka suletud kanali vool, mis võib samuti olla andmetes antud.

Sagedus- ehk dünaamilisteks parameetriteks, mille alusel saab määrata antud transistori võimenduse piirsagedusi, on kaks mahtuvust:

C_{GS} - sisendmahtuvus ja

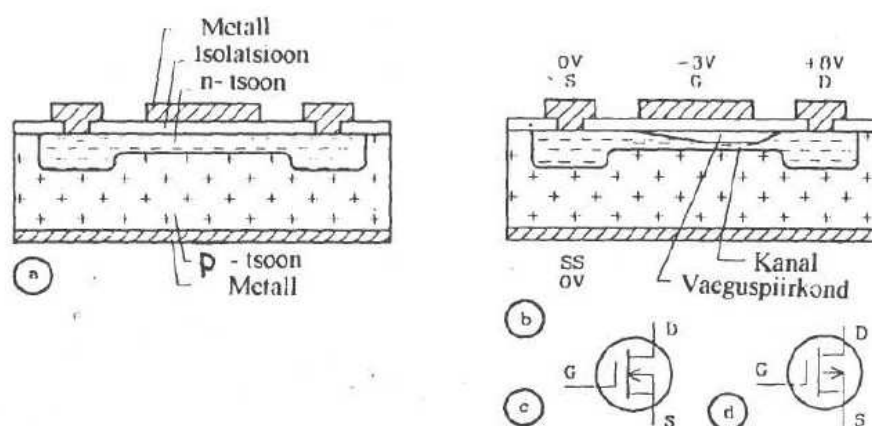
C_{GD} - läbivmahtuvus e. mahtuvus sisendi ja väljundi vahel.

7.3. Isoleeritud paisuga väljatransistorid (MOSFET).

Isoleeritud paisuga väljatransistoride eripäraks on see, et paisu ja kanali vahel on õhuke isoleerkiht, milleks on SiO_2 kiht. Sõltuvalt kanali tekitamise meetodist jagunevad MOSFET transistorid formeeritud kanaliga ja indutseeritud kanaliga MOSFET transistorideks. Need omakorda võivad olla kas n- või p-kanaliga. Seega on väljatransistore kuut erinevat liiki.

7.3.1. Formeeritud kanaliga MOSFET transistorid Depletion-Type MOSFET

Vaatleme n-kanaliga transistori kui enamlevinut, p-juhtivusega põhimaterjali on formeeritud lisandite abil läte ja neelu vahel n-juhtivusega kanal, mille peal on õhuke SiO_2 isolatsioon ja sellel omakorda metallist paisuelektrood. Läte- ja neelualused tsoonid on parema juhtivuse saamiseks tavaliselt kõrgendatud, s.o. n^+ juhtivusega. Aluskristalliga ühendatud metallelektrood on ühendatud kas lättega või toodud välja eraldi elektroodina. Sellise transistori skemaatiline ehitus koos n- ja p-kanaliga transistoride tingmärkidega on toodud joonisel 7.5.



JOONIS 7.5.

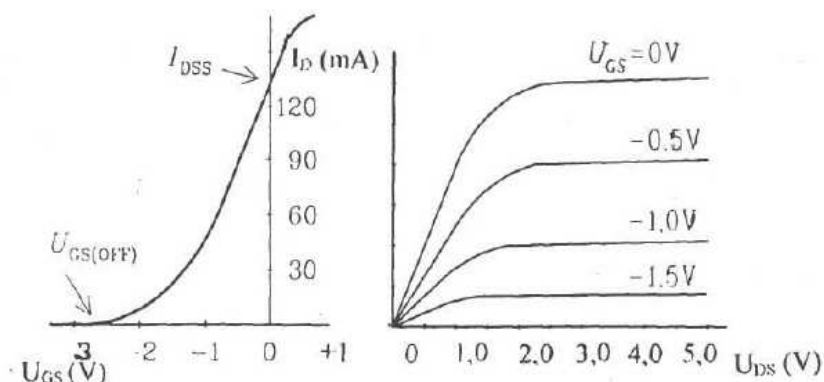
Kui transistori paisule antav pinge on null, tekib läbi kanali mingi vool. Paisule antava pinge mõjul tekib paisuelektroodi all selle pingest põhjustatud elektriväljatsoon,

kus elektrivälja suund sõltub paisupinge polaarsusest. Kui paisupinge on negatiivne, on see elektriväli suunatud aluselt paisule ja hakkab elektrone paisualusest tsoonist ära tõrjuma. Paisu all tekib tühjenduspiirkond, kust elektronid on lahkunud; kanali ristlõige väheneb koos voolu vähenemisega. Negatiivse paisupinge teatud väärtusel kanal sulgub. Sellist režiimi nimetatakse vaegusrežiimiks.

Tänu paisu all olevale isoleerkihile võime anda paisule ka positiivse pinge. See on rikastusrežiim, kus elektriväli on suunatud paisult alusele. Selle toimel nihkuvad p-tsooni augud aluse suunas ja kanal laieneb koos voolu suurenemisega.

Seega võib formeerkanaliga MOSFET transistor töötada mõlemapolaarse paisu-pingega. Sellise transistori ülekande- ja väljundtunnusjooned on toodud joonisel 7.6.

JOONIS 7.6.



Kuigi

eelnimetatud põhjustel kasutatakse enamasti n-kanaliga MOSFET transistore, toodetakse ja kasutatakse ka p-kanaliga transistore. Nende kasutamisel tuleb vaid arvestada pingete vastupidise polaarsusega.

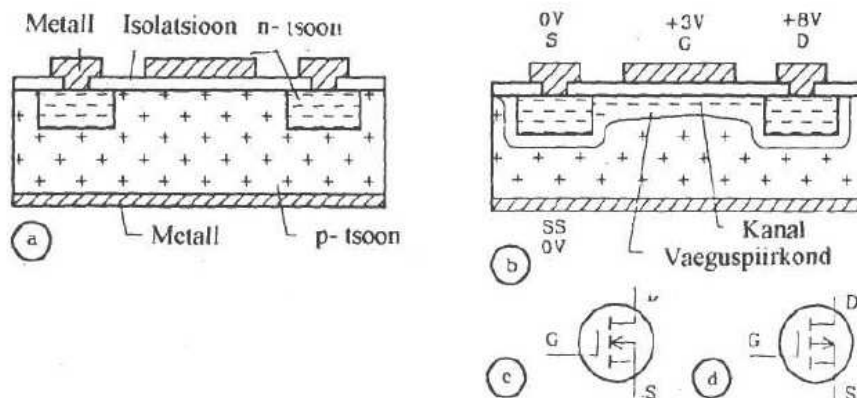
MOSFET transistorid on leidnud küllalt laia kasutust ka suurevõimsuselistes nn. jõutransistoridenas. Selleks otstarbeks kasutatakse paralleelselt ühendatud transistori struktuure, millede voolud liituvad. Taolised paralleelühendused on võimalikud tänu väljatransistori erilisele temperatuuriomadusele. See seisneb selles, et temperatuuri tõustes tõkkekihile tsoon laieneb ja vool väheneb. Kui mingil põhjusel ühes transistori struktuuris tekib kuumenemine, siis nimetatud efekti tulemusena väheneb automaatselt vool ja ka kuumenemine. Bipolaartransistoride taolisel paralleellülitusel aga tekib kuumenemisest juhtivuse suurenemine, vool selles elemendis suureneb veelgi ja lõpuks see struktuur hävib. Selle omaduse tõttu jagab väljatransistoride paralleelühendus automaatselt voolusid struktuuride vahel ilma riknemise ohuta.

Suurevõimsuselisi transistore kasutatakse sageli lülititena. Sellisel kasutusel on vaja võimalikult väikest kanali takistust. Selle saavutamiseks on välja töötatud mitmeid võimsate MOSFET transistoride eriliike.

7.3.2. Indutseerkanaliga MOSFET transistor

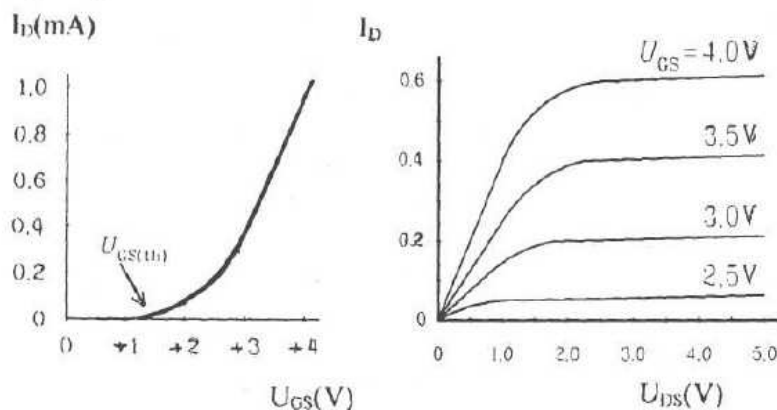
Enhancement-Type MOSFET

Indutseerkanaliga MOSFET transistor erineb eelmisest selle poolest, et tal on küll lätte- ja neeluelektroodide all n^+ tsoonid, kuid nendevaheline kanal on jäetud tekitamata. Tulemusena on millisel paisupingel ka neeluvool null. Juhtiv kanal tekib paisu-aluse elektrivälja toimel ainult rikastusrežiimis, kus elektriväli tõrjub augud paisust eemale ja lätte ja neelu vahel tekib voolujuhtiv kanal, mis on seda laiem, mida suurem on positiivne paisupinge. Paisu ja lätte vahelist pinget U , mil transistor avaneb, nimetatakse lävipingeks. Selle transistori skemaatiline ehitus on toodud joonisel 7.7.



JOONIS 7.7.

Seega saab n-indutseerkanaliga MOSFET transistor töötada ainult läte suhtes positiivse pingega paisul. Sama selgub ka indukteerkanaliga MOSFET transistori tunnusjoontelt, mis on toodud joonisel 7.8. Indutseerkanaliga MOSFET transistorid on väga laialt kasutusel digitaalsetes integraalskeemides, kuna nende valmistamis-tehnoloogia on lihtsam ja odavam (jääb ära kanali formeerimine). Eriliks on kujunenud nn. komplimentaär ehk CMOS loogika, kus kasutatakse ühiselt koos n- ja p-kanaliga väljatransistore.



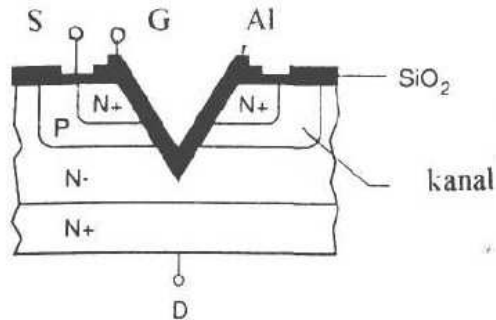
JOONIS 7.8.

7.4. Suurevõimsuselised väljatransistorid

Power MOSFET

7.4.1. VMOS transistor

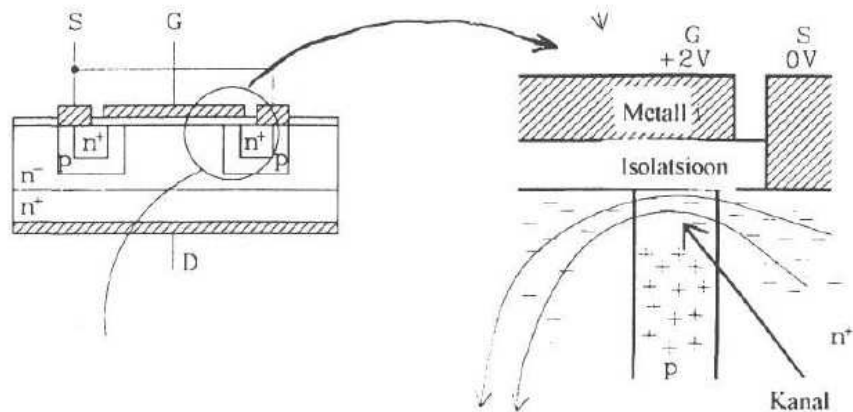
VMOS väljatransistor on saanud oma nime konstruktsiooni V-kujulisest ristlõikest. Ta on indukteerkanaliga väljatransistor, mille eripäraks on paisu kraatri-taoline kuju, mis on näha ka joonisel 7.9. Tehnoloogiast tulenevalt on paisualune p-tsoon väga õhuke ja kui paisupinge toimel indukteeritakse seal kanal, on see lühike ja suhteliselt suure ristlõikega. Ka on selline struktuur sobiv paralleelühendusteks, kuna neeluelektrood jääb ühiseks. Tänu lühikesele ja "suure" ristlõikega kanalile on kanali takistus väiksem. Selline ehitus sobiv suurevõimsuseliste transistoridele.



JOONIS 7.9.

7.4.2. DMOS transistor.

Nimetatud transistor on oma ehituselt sarnane VMOS transistoriga, kuid tal puudub koonilise kraatri taoline pais. Samaegselt on ta samuti indutseerkanaliga transistor. Joonisel 7.10 toodud skemaatilisel ristlõikel on kaks transistori ühendatud paralleelselt ühise paisuelektroodiga. Selliselt võib neid paralleelselt ühendada ka rohkem. Läte on kolmest küljest ümbritsetud p-tsooniga ja kui pais on pingestamata, ei ole voolu tekkimise võimalust. Andes paisule positiivse pinge, nihkuvad elektrivälja toimetel augud paisu alt eemale, sinna tõmmatakse elektrone ja tekibki voolujuhtiv kanal, mille ristlõige on seda suurem, mida positiivsem on paisupinge. Nagu joonise põhjal otsustada võib, on DMOS transistori kanal lühike ja suure ristlõikega, mis on sobiv jõutransistorile. Selle transistori ehitus ei ole sümmeetriline ja seepärast ei ole lubatud suudme ja läte elektroodide vahetamine.



JOONIS 7.10.

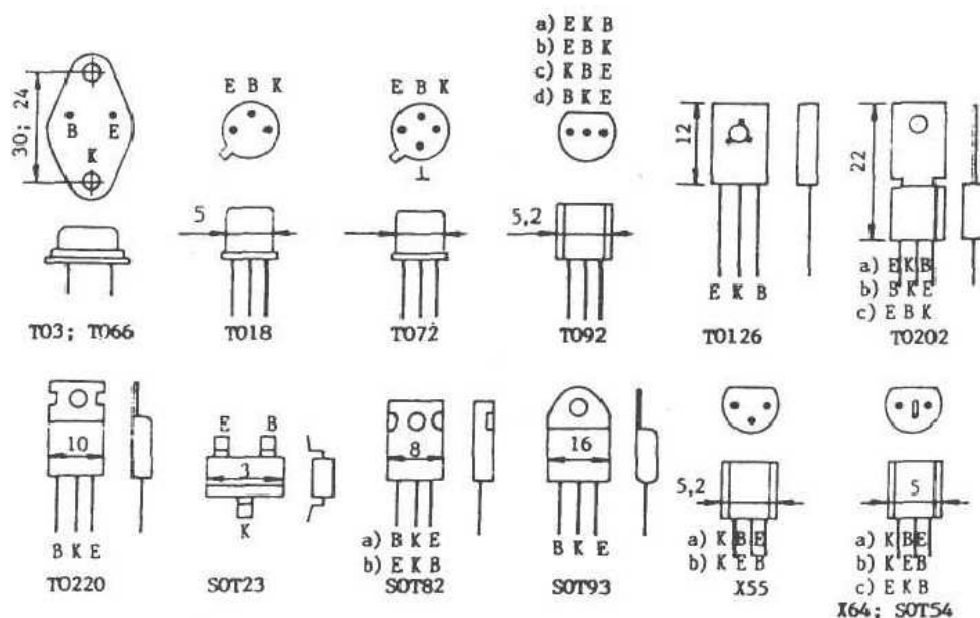
7.4.3. IGBT transistor (*Isolated Gate Bipolar Transistor*).

Bipolaarse transistoridega võrreldes on väljatransistoride eripäraks see, et neil suurima voolu režiimis s.o. töötamisel lülitina, ei ole sellist küllastusrežiimi kui bipolaartransistoridel, kus kollektori ja emitteri vaheline pingelang ei sõltu teda läbivast voolust. Sisselülitatud lülitina töötades on neil küll kanali takistus väga väike (minimaalselt mõni kümnendik oomi), kuid pingelang sõltub Ohmi seaduse kohaselt teda läbivast voolust.

The diagram on the left shows a cross-section of an n-channel MOSFET. It features a p-type substrate with an n+ emitter region at the bottom. A gate stack is on top, with a gate terminal labeled 'G' (Pais) and a source terminal labeled 'E' (Emitter). The channel region is labeled 'n-kanal'. The collector region is labeled 'C' (Kollektor). The diagram on the right shows the standard MOSFET symbol, with the gate terminal labeled 'G (Pais)', the collector terminal labeled 'C (Kollektor)', and the emitter terminal labeled 'E (Emitter)'.

7.6. Transistoride tähistus

Reeglina kasutatakse transistoridel standardseid korpuse, mille kujud ja tähised on toodud joonisel 7.13.



JOONIS 7.13.

Tähistussüsteemid on riikidel erinevad, kusjuures paljud firmad kasutavad veel oma tähistussüsteemi. Toome siin Euroopa, USA, Jaapani ja Vene tähistussüsteemi. Transistori tähis koosneb kolmest kuni kuuest elemendist, mis on kas numbrid või tähed, kusjuures üksikute elementide vahel tühikut ei ole.

Euroopa süsteem. Tähis koosneb kolmest või neljast elemendist. Esimene element on täht, mis määrab kasutatud pooljuhtmaterjali: A - germaanium, B - räni, C - galliumarseniid. Teine element koosneb kas ühest või kahest tähest, mis määravad transistori liigi (kasutusala): F ja L - väikese ja suure võimsusega kõrgsagedus-transistor, S ja U - väikese ja suure võimsusega lülitustransistor. Kolmas element on kahe- või kolmekohaline number, mis on antud toote registreerimisnumber ehk tüübi järjekorranumber. Neljas element on täht, mis osutab mingile versioonile põhitud erineva parameetri või korpuse osas (see element võib ka puududa). Näiteks BF321S on kõrgsageduslik räni transistor, järjekorranumbriga 321 ja versioon S. Täpsemad tehnilised andmed selguvad alati tootekataloogist või andmelehel.

USA süsteem. Tähis koosneb kolmest elemendist. Esimene element on kahekohaline pooljuhtseadise liigi täht, transistor on 2N. Teine element on kolme- või neljakohaline number, mis on toote registreerimisnumbriks. Neljas element on täht, mis määrab teisendi mõne parameetri osas. Näiteks 2N760A on transistor, mis on registreeritud numbri 760, versioon A.

Jaapani süsteem. Tähis koosneb kolmest või neljast elemendist. Esimene element määrab pooljuhtseadise liigi: transistor on 2S. Teine element on täht, mis määrab täpse-

malt seadise alaliigi: A - kõrgsageduslik p-n-p-transistor, B - madalsageduslik p-n-p-transistor, C - kõrgsageduslik n-p-n-transistor, D - madalsageduslik n-p-n-transistor, I - p-kanaliga väljatransistor, K - n-kanaliga väljatransistor. Kolmas element on toote registreerimisnumber. Neljas element on täht, mis määrab versiooni. Näiteks 2SA522 on madalsageduslik p-n-p transistor, registreerimisnumbriga 522, versiooni ei ole.

Vene süsteem. Tähtis koosneb viiest või kuuest elemendist. Esimene element on kas täht või number, mis määrab seadise valmistamiseks kasutatud materjali: F või 1 -germaanium, K või 2 - räni, A või 3 - galliumi ühendid. Teine element on täht, mis määrab seadise liigi: T - bipolaartransistor, n - väljatransistor. Kolmas element on number, mis määrab elektrilised omadused: 1, 4 ja 7 - väikese-, kesk- ja suurevõimsuselised madalsagedustransistorid, 2, 5 ja 8 - väikese-, kesk ja suurevõimsuselised kesksagedustransistorid, 3, 6 ja 9 - väikese-, kesk- ja suurevõimsuselised kõrgsagedus-transistorid. Neljas element on tüübi järjekorranumber (kas kahe- või neljakohaline). Viies element on täht, mis määrab versiooni parameetrite osas. Kuues element on number või täht, mis määrab korpuse versiooni. Näiteks KT3126A9 on väikese-võimsuseline kõrgsageduslik ränitransistor registreerimisnumbriga 126, parameetrite versioon A, väikeses plastkorpuses trükkplaadile jootmiseks.