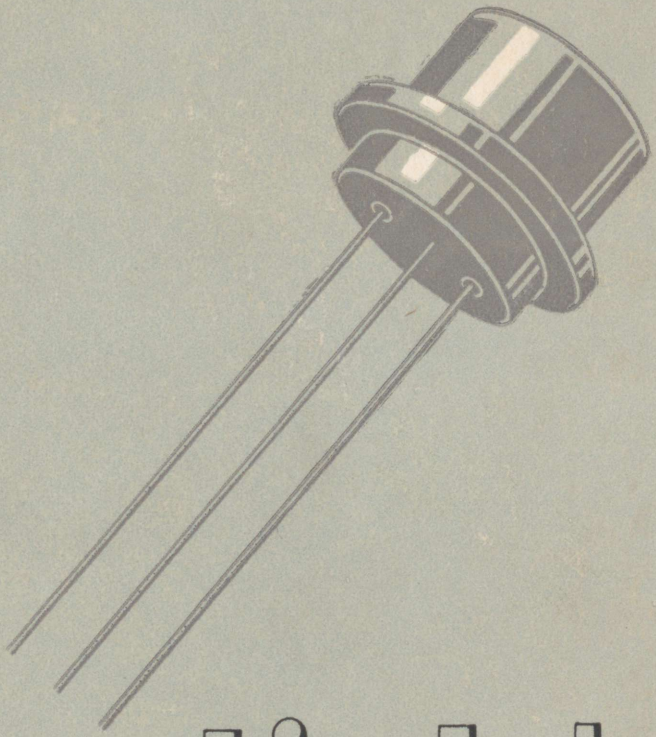


Pooljuht-seadiste tootmine

A-29722

H. PÖÖGELMANNI NIM. ELEKTROTEHNIKA TEHAS

E. LINNAS, E. TAASVÄLI, H. RÜÜTELMAA, L. MIHKLA, L. RÄMMEL, V. ALUVEE, V. KRIST, A. VAPPER

POOLJUHTSEADISTE TOOTMINE

KIRJASTUS «VALGUS» • TALLINN 1969

6T2.151
P68

УДК 621.382.333.3

Kunstiliselt kujundanud *R. Kelu*

Производство полупроводниковых приборов

Э. Линнас, Э. Таасвяли, Х. Рюютельмаа, Л. Михкла, Л. Ряммель, В. Алувэе, В. Крист, А. Ваппер

1969

В книге изложены материалы о физических основах работы полупроводниковых приборов. Описаны технология изготовления и методы измерения электрических параметров приборов.

Книга может служить пособием для подготовки и повышения квалификации рабочих полупроводниковых заводов.

Käesolevas raamatus käsitletakse pooljuhtseadiste töötamise füüsikalisi aluseid ja valmistamise tehnoloogiat. Põhjalikumalt on kirjeldatud kõrgsagedustransistoride valmistamist.

Raamat on mõeldud pooljuhttööstuses töötavate tööliste kvalifikatsiooni tõstmiseks.

Retsenseerinud *E. Velmre*

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
74017
ARHIIVKOGU

SISSEJUHATUS

Käesolev raamat sisaldab õppematerjale pooljuhtide tööstuses töötavate tööliste jaoks nende teoreetiliste teadmiste ja tööalase kvalifikatsiooni tõstmiseks. Õppematerjali on antud sellisel hulgal, mis vastab II ... III kvalifikatsioonikategooria nõuetele. Põhiliselt on materjal esitatud sellises järjekorras, mis vastab transistoride valmistamise tehnoloogilisele protsessile. Raamatu koostamisel oli eeskujuks 1963. a. Moskvas B. A. Bruki jt. autorite poolt väljaantud raamat [4].

Raamatu esimeses peatükis antakse ülevaade pooljuhtmaterjalide teooria põhialustest. Siin käsitletakse tahke aine struktuuri, elektrijuhtivuse tsooniteooriat, elektron- ja aukjuhtivust, *p-n*-siirete tekkimist ning tähtsamaid omadusi.

Teises peatükis käsitletakse pooljuhtseadiste füüsikat. Siin tutvustatakse lugejale pooljuhtdioodi, transistori, türistori jt. pooljuhtseadiste töötamise põhimõtteid, samuti tuuakse pooljuhtseadiste liigitus.

Kolmandas peatükis tutvustatakse lugejat tehases kasutatavate tähtsamate pooljuhtmaterjalidega. Suuremat tähelepanu on pööratud eelkõige räni ja germaaniumi kui põhiliste materjalide füüsikalistele ning keemilistele omadustele.

Neljandas peatükis vaadeldakse tootmises kasutatavaid abimaterjale.

5. ... 9. peatükis käsitletakse tehnoloogiaküsimusi.

Viiendas peatükis vaadeldakse germaanium- ja ränivalandite lõikamist plaatideks ja plaatide lihvimist ning seadmeid.

Germaaniumi ja räni keemilisele töötlemisele ja aluste valmistamise galvaanikale on pühendatud kuues peatükk.

p-n-siirete valmistamise tehnoloogiat on kirjeldatud seitsmendas peatükis. Siin on toodud seitse erinevat tehnoloogilist viisi *p-n*-siirete saamiseks. Samuti käsitletakse selles peatükis termilise töötlemise ja vaakuumitehnika seadmeid.

Kaheksandas peatükis käsitletakse pooljuhttoodete koostamise seadmeid ja operatsioone. Lugejat tutvustatakse elektrikeevituse, külmkeevituse, termokompressiooni, jootmise jt. tehnoloogiliste võtetega.

Üheksas peatükk sisaldab materjali pooljuhttoodete katsetajale. Siin tutvustatakse lugejat transistoride parameetrite ja nende mõõtmise metoodikaga.

Kümnendas ja üheteistkümnendas peatükis vaadeldakse elektrotehnika aluseid ja mõõtmistehnika üldisi küsimusi.

Raamatu kirjutasid H. Pöögelmanni nim. Elektrotehnika Tehase insenerid: I ja II peatükk — E. Linnas; III peatükk — E. Taasväli ja H. Rüütelmaa; IV peatükk — E. Taasväli, H. Rüütelmaa ja L. Mihkla; V peatükk — A. Vapper ja H. Rüütelmaa; VI peatükk — L. Mihkla ja L. Rämmel; VII peatükk — L. Rämmel ja H. Rüütelmaa; VIII peatükk — V. Aluvee; IX, X ja XI peatükk — V. Krist.

1. POOLJUHTIDE TEOORIA PÕHIALUSED

1.1. AATOMI EHITUS

A a t o m i k o o s t i s o s a d. Teatavasti koosnevad kõik meid ümbritsevad kehad molekulidest, mis on omakorda üles ehitatud aatomitest. Kuni XIX sajandi lõpuni valitses keemias ja füüsikas veendumus, et aatom on lihtaine väikseim osake, mateeria jagunemise viimne piir. Kõikide keemiliste muunduste puhul purunevad ja tekivad uuesti ainult molekulid, aatomid aga jäävad muutumatuks ega saa jaguneda väiksemateks osadeks.

Esimesi vihjeid aatomite keerukale struktuurile saadi siis, kui hakati uurima elektrilahenduse puhul tugevasti hõrendatud gaasides tekkivate katoodkiirte omadusi. Katoodkiirte omaduste uurimine viis järeldusele, et nad kujutavad enesest üliväikeste negatiivselt laetud osakeste voolu, mille kiirus on pool valguse kiirusest. Selgus, et iga osakese mass võrdub 0,00055 hapnikühikuga, mis moodustab ainult $\frac{1}{1840}$ vesiniku aatomi — kõige kergema aatomi — massist. Osakese laeng võrdus aga $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ kuloniga.

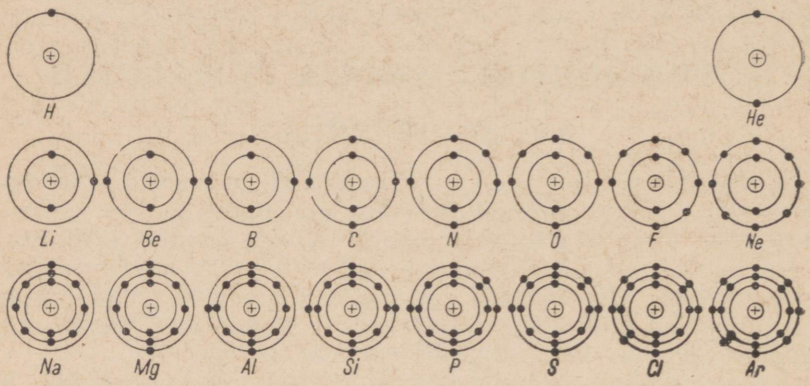
Kuna katoodosakeste mass kui ka laeng ei olene katoodtorusse jäänud gaasi iseloomust, elektroodide materjalist ega teistest katsetingimustest, siis nende tekkimise ainukeseks seletuseks on see, et nad kuuluvad mistahes elemendi aatomi koostisse. Katoodosakesi hakati nende negatiivse laengu tõttu nimetama elektronideks.

Nüüdisaegsete vaadete järgi on elektroni laeng väikseim elektrilaeng, väikseim elektrihulk, mis üldse saab eksisteerida. Elekter koosneb üksikutest osakestest — elektronidest. Igas laetud kehas on tingimata täisarv elektrone.

Teiselt poolt kinnitavad arvukad uurimised nii füüsika kui ka keemia alal, et kõikide ainete molekulid ja aatomid on elektriliselt neutraalsed. Siit võib järeldada, et aatomil on veel mingid koostisosad, mille laengud peavad olema suuruselt võrdsed elektronide laenguga, kuid erinevate märkidega.

Selle positiivselt laetud aatomi osa avastas 1911. aastal inglise teadlane Rutherford, kes uuris α-osakeste (teatud väikesed positiivselt laetud aineosakesed) liikumist gaasides ja teistes ainetes.

α-osakeste hajumise uurimine mitmesugustes ainetes viis järeldusele, et aatomi põhimass on koondatud väga väikesesse ruumalasse ja kannab positiivset laengut. Seda aatomiosa nimetatakse tuumaks. On kindlaks tehtud, et aatomituum võtab enda alla ainult tühise osa aatomi ruumalast, aatomi kogu positiivne laeng ja mass (peale selle, mis kuulub elektronidele) on koondatud aatomituuma. Aatomituuma laeng on arvuliselt võrdne elemendi järjekorranumbriga Mendelejevi süsteemis.



Joon. 1. Aatomite elektronkatted

A a t o m i s t r u k t u u r. Käesoleval ajal on kindlalt tõestatud, et iga aine aatom koosneb positiivselt laetud tuumast ja negatiivselt laetud elektronidest. Teadlaste käsutuses olevate andmetega on kindlaks tehtud, et elektronid asuvad väljaspool tuuma. Asetsedes väljaspool tuuma, ei saa elektronid tuuma suhtes paigal püsida, sest sellisel korral tõmbaks tuum neid kui erinimelisi osakesi Coulomb'i seaduse järgi enda ligi. Järelikult tiirlevad elektronid ümber tuuma (joon. 1).

Elektronide arv aatomis võrdub tuumas sisalduvate elementaarlaengute arvuga, kuna nad oma negatiivsete laengutega neutraliseerivad tuuma positiivse laengu.

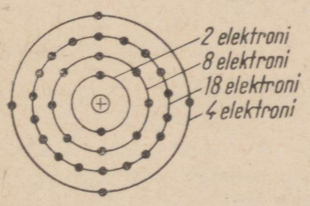
Elektronid ei tiirle ümber tuuma juhuslikult, vaid nad on jaotatud teatud kihtidesse, moodustades tuuma ümber elektronkatte. Vesiniku tuuma ümber liigub üks elektron. Alates heeliumist liiguvad tuumale lähemas kihis kaks elektroni. Elementides, mis kuuluvad Mendelejevi süsteemi teise perioodi, moodustavad elektronid, v. a. kaks esimest elektroni, teise kihi, kusjuures selle perioodi esimese rühma element liitium sisaldab selles kihis 1 elektroni, teise rühma element berüllium 2 elektroni, kolmanda rühma element boor 3 elektroni jne. kuni 0-rühma elemendi neoonini — 8 elektroni. Kolmanda perioodi esimese rühma elemendil naatriumil on jällegi väliskihis 1 elektron. Ülejäänud kol-

manda perioodi elementides naatriumist kuni argoonini suureneb elektronide arv kolmandas kihis jällegi 1-st kuni 8-elektronini.

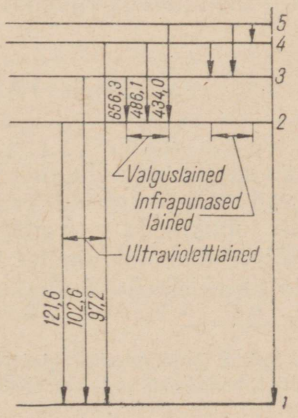
Elementides, mille järjekorranumber on veel suurem, muutub elektronide kihtidesse jagunemine keerulisemaks.

Näiteks germaaniumil (joon. 2) on esimeses kihis 2, teises kihis 8, kolmandas 18 ja välimises, 4. kihis 4 elektroni. Igasse elektronkihti mahub seega ainult teatud kindel arv elektrone. Kooskõlas energia miinimumi printsiibiga täidavad elektronid esmajärjekorras aatomi seesmised kihid, mistõttu välimised elektronkihid jäävad sageli ainult osaliselt täidetuks. Väliskihi elektrone nimetatakse valentselektronideks ja kihti ennast valentskihiks. Valentselektronid omavad eriti suurt tähtsust, sest nad seovad molekulideks ning määravad aine keemilised, elektrilised ja optilised omadused. Valentselektronid on oma aatomituumaga suhteliselt nõrgalt seotud, sest nad asuvad tuumast kõige kaugemal. Saanud väljastpoolt energiat juurde, võivad valentselektronid oma aatomist hoopis lahkuda, muutudes vabadeks elektronideks. Aatomid, mis on loovutanud ühe või mitu elektroni, omandavad positiivse laengu, sest tuuma laeng ületab allesjäänud elektronide laengute summa. Vastupidi, liigseid elektrone omastanud aatomid muutuvad negatiivselt laetuks. Sel viisil tekkivaid, vastavatest aatomitest kvalitatiivselt erinevaid laetud osakesi nimetatakse ioonideks.

A a t o m i e n e r g i a n i v o o d. Vastavalt Bohri esimesele postulaadile ei või elektron ümber tuuma tiirelda mitte meelevaldsetel kaugustel, vaid ainult täiesti kindlatel, nn. statsionaarsetel orbiitidel, teisiti öeldes, elektron võib viibida ainult statsionaarsetes seisundites (energiaolekutes). Igale võimalikest lubatud kaugustest vastab kindel elektronienergia. Energiahulka, mida elektron võib omada, nimetatakse energianivooks ja see muutub samuti hüppeliselt. Energianivoosid võib kujutada graafiliselt (joon. 3).



Joon. 2. Germaaniumi aatomi mudel



Joon. 3. Aatomi energianivoode skeem

Mingi horisontaalne joon võetakse nivooks, mis vastab häirimata (ergastamata) aatomile, nn. aatomi normaalsele olekule, s. t. elektroni asetsemisele lähimal tõenäolisel kaugusel aatomituumast. Vertikaalsel sirgel märgitakse leppelises mõõtkavas järgnevate energiahulkade juurdekasvud normaalse energiaoleku suhtes ja tõmmatakse läbi lõikude otspunktide horisontaalsed sirged, mis kujutavadki graafiliselt energianivoosid.

Normaalses olukorras on elektronid aatomis asetunud kõige madalamatele lubatud energianivoodele. Sel juhul räägitakse, et aatom viibib põhiseisundis. Kuid kõik elektronid ei oma ühesugust energiat. Vastavalt Pauli printsiibile ei saa aatomis ühes energiaolekus viibida korraga rohkem kui kaks elektroni vastupidiste spinnidega [1]. Antud juhul tähendab see seda, et ühel energianivool ei saa viibida üle kahe elektroni.

Kui aatomile anda väljastpoolt energiat juurde, võib üks või mitu elektroni üle minna oma põhinivoolt mõnele kõrgemale vabale nivoole. Sel juhul öeldakse, et aatom on ergastatud seisundis; vastavaid nivoosid nimetatakse ergastatud nivoodeks. Mõne aja pärast läheb aatom tagasi põhiseisundisse, s. t. elektron langeb tagasi endisele nivoole, kusjuures vabaneb sama energiahulk, mis aatomi poolt varem neelati. Et energianivood paiknevad aatomis diskreetselt, s. t. neile vastavad energiad erinevad üksteisest teatava lõpliku suuruse võrra, siis võivad aatomid neelata ja kiirata energiat samuti ainult kindlate diskreetsete portsjonitena, nn. energiakvantidena. Kiirguse sagedus on seda suurem ja lainepikkus seda väiksem, mida kaugemal üksteisest asuvad energianivood.

Nii kiirgab vesiniku aatom valguslaineid elektroni üleminekul kolmandalt ($\lambda = 656{,}3$ mμ), neljandalt ($\lambda = 486{,}1$ mμ) või viiendalt ($\lambda = 434{,}0$ mμ) nivoolt teisele nivoole, ultravioletseid laineid teiselt ($\lambda = 121{,}6$ mμ), kolmandalt ($\lambda = 102{,}6$ mμ) või neljandalt ($\lambda = 97{,}2$ mμ) üleminekul esimesele nivoole ja infrapunaseid laineid neljandalt või viiendalt üleminekul kolmandale nivoole, samuti üleminekul viiendalt neljandale (joon. 3).

1.2. TAHKE AINE EHITUS

Tahke aine kristalliline struktuur. Vaatleme, kuidas asetsevad aatomid mitmesugustes ainetes, kas siin on täheldatavad mingisugused seaduspärasused või on osakeste asetus täiesti juhuslik ja korrapäratu.

Kõigil tahketel ainetel, nende hulgas tahketel pooljuhtidel on kristalliline ehitus. Selles on kerge veenduda, kui purustada tükk

[1] Spinn iseloomustab elektroni pöörlemist ümber oma telje. Vastupidised spinnid tähendavad seda, et elektronide pöörlemise suunad on vastupidised.

ainet ja vaadelda saadud murdekohta. Tavaliselt võib murdekohal (näiteks raual) märgata mitmesuguste nurkade all asetsevate peenikeste kristallide tahke, mis sädelevad erineva peegeldusvõime tõttu.

Vedelikud ja amorfsed kehad on isotroopsed, s. t. nende kehade füüsikalised omadused on kõikides suundades ühesugused. Kristalsete kehade peamine erinevus amorfsetest kehadest seisneb nende anisotroopsuses, s. t. kristallide füüsikalised omadused on eri suundades isesugused. Näiteks mõnes tasapinnas võib kristall kergesti puruneda, samal ajal kui teistes pindades võib kristalli murdetugevus olla väga suur.

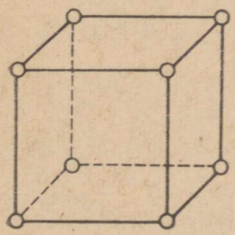
Mõnedel kristallilise ehitusega kehadel, näiteks metallidel, ei väljendu anisotroopsus alati teravalt. Lähemal vaatlemisel selgub, et sellised kehad koosnevad paljudest väikestest kristallikestest, mis on paigutunud ebakorrapäraselt. Erinevalt monokristallilistest nimetatakse selliseid kehi polükristallilisteks.

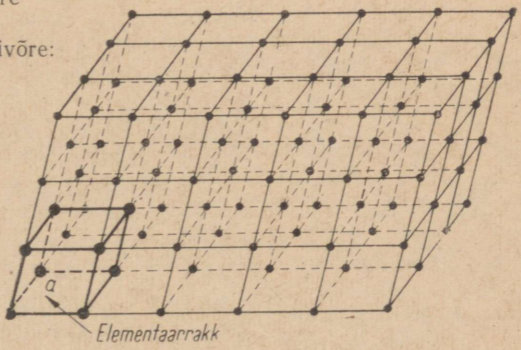
K r i s t a l l i d e l i i g i t u s. Monokristallide teravalt väljenduv anisotroopsus on tingitud sellest, et aatomid või molekulid on asetunud korrapäraste ridadena piki kolme (üldiselt kaldnurkset) koordinaattelge, moodustades nn. ruum- ehk kristallivõre (joon. 4). Mõnedes kristallides asetsevad ruumvõre sõlmpunktides molekulid (molekulaarsed võred), teistes kristallides, näiteks teemandis, asetsevad ruumvõre sõlmedes aatomid (homeopolaarsed võred); paljudes kristallides, näiteks keedusoolas, asetsevad ruumvõre sõlmedes ioonid (heteropolaarsed võred). Kristallivõre koosneb elementaarrakkudest. Elementaarraku all mõistetakse kristallivõre sellist osa, mille ümberpaigutumisel tema endaga paralleelselt (joon. 5) on võimalik saada kogu kristallivõre. Röntgenikiirte rakendamine kristallide uurimiseks andis võimaluse määrata paljude kristallide ruumvõre iseloomu ja jaotada neid liikideks. Allpool tuuakse kõige tähtsamad neist liikidest.

1. K u u b i l i n e l i h t v õ r e (joon. 4) koosneb aatomitest

Joon. 4. Kuubiline lihtvõre

Joon. 5. Tahke aine kristallivõre:
a — elementaarrakk

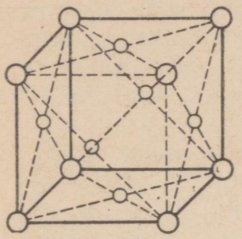




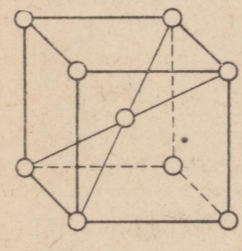
või ioonidest, mis asuvad kuubi tippudes. Niisugune kristallivõre on näiteks keedusoola (NaCl) kristallil.

2. Tahkkesendatud kuubiline võre (joon. 6). See võre erineb kuubilisest lihtvõrest selle poolest, et aatomid või ioonid pole paigutunud mitte ainult kuubi tippudesse, vaid ka kõikide tahkude keskpunktidesse. Niisuguse võretüübi näiteks on metall alumiinium.

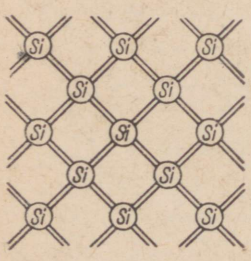
3. Ruumkesendatud kuubiline võre (joon. 7). Siin on osakesed paigutunud elementaarsete kuupide tippudesse ja iga kuubi keskpunkti. Niisugune võre on raual ja mõnedel teistel ainetel, kuid pooljuhid niisuguse võretüübiga kristallideks ei kristalliseeru.



Joon. 6. Tahkkesendatud kuubiline võre



Joon. 7. Ruumkesendatud kuubiline võre



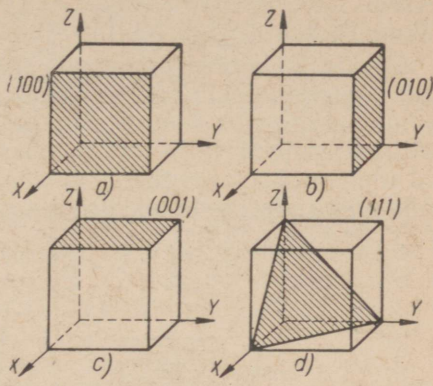
Joon. 8. Räni kristallivõre

Peale eespool nimetatud kolme liigi eksisteerib veel terve rida keerulisemaid võreliike, kuid kõikidel neil on kuubikujuline elementaarrakk. Üks tähtsamaid neist võretüüpidest on teemanditüüpi võre, mis kujutab endast modifitseeritud tahkkesendatud kuubilist võret. Teemanditüüpi võre koosneb kahest niisugusest võrest, mis on teineteise suhtes nihutatud. Seda võret iseloomustab see, et igal aatomil on neli lähimat naabrit, mis on temaga seotud nn. kovalentsete sidemetega. Niisugune võre on pooljuhtide tööstuses kasutatavatel põhimaterjalidel, germaaniumil ja ränil.

Germaanium ja räni asuvad Mendelejevi tabeli neljandas rühmas ja neil on järelikult neli valentselektroni. Seepärast ongi räni ja germaaniumi kristallis iga aatom seotud nelja lähima naaberaatomiga. Iga kaks aatomit on omavahel seotud kahe neile ühise valentselektroniga. Parema ülevaate saamiseks on räni (germaaniumi) võre kujutatud joonisel 8 tasapinnalise võrguna. Iga aatom on seotud nelja naaberaatomiga, kusjuures iga kahe aatomi vahel on kaks sidet.

Tihti on tarvis teada kristalli ühe või teise tasapinna orientatsiooni. Selleks otstarbeks on võetud kasutusele tingtähised, nn. Milleri indeksid (joon. 9).

YZ-tasapinnaga paralleelset kristalli tasapinda (joon. 9, *a*) tähistatakse (100), *XZ*-tasapinnaga paralleelset kristalli tasapinda (joon. 9, *b*) tähistatakse (010) ja *XY*-tasapinnaga paralleelset kristalli tasapinda (joon. 9, *c*) tähistatakse (001).



Joon. 9. Kristallograafilised tasapinnad:
a — tasapind (100); *b* — tasapind (010); *c* — tasapind (001); *d* — tasapind (111)

Lisaks ülalmainitud tasapindadele on pooljuhtide tehnoloogias veel vaja teada tasapinna (111) asendit. Seda tasapinda (joon. 9, *d*) iseloomustab aatomite kõige tihedam paigutus.

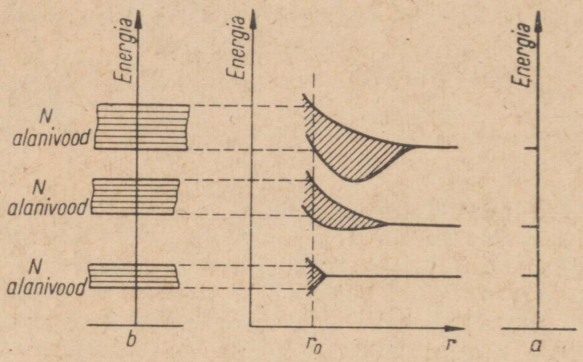
Energianivood kristallis. Esimeses punktis näidati, et elektronid asetsevad aatomis teatud kindlatel diskreetsetel kaugustel tuumast ja igas olekus on elektronil teatud energia. Selline on olukord siis, kui aatomid asuvad üksteisest küllalt suurtel kaugustel, nii et iga aatomi elektriväli praktiliselt ei mõjusta naaberaatomeid, näiteks hõrendatud gaasides. Hoopis teistsugused tingimused valitsevad tahketes kristallilistes kehades. Kristallides paiknevad aatomid korrapäraselt kristallivõre sõlmedes ja asuvad üksteisele niivõrd ligidal, et naaberaatomite elektriväljad mõjustavad oluliselt üksteist. Selle tagajärjel kujuneb kristallivõres perioodiline elektriväli. Välja perioodilisus tahkes kristallilises kehas on väga oluliseks eelduseks nn. tsooniteoorias, mis selgitab elektrijuhtivuse nähtusi tahketes kehades.

Tsooniteoorias näidatakse, et juhul kui suur hulk aatomeid või molekule läheneb üksteisele niivõrd, et tekib tahke kristalliline keha, siis üksikute aatomite elektriväljad liituvad ja moodustavad perioodilise välja.

Aatomite vastastikuse mõju tagajärjel lõhestuvad nende energianivood suuruselt üksteisest väga vähe erinevateks, kuid siiski iseseisvateks nivoodeks, mille arv vastab aatomite hulgale tahkes kehas. Seejuures on lõhenemine seda suurem, mida tugevam on elektriväli. Sisemistele elektronkihtidele vastavad nivood lõhestuvad suhteliselt vähe, sest välimised elektronkihid varjestavad sisemisi elektrone naaberaatomite väljade mõju eest. Valentskihi elektronide energianivood lõhestuvad ja moonutuvad nii tugevasti, et on võimatu kindlaks teha nende kuuluvust ühe või teise aatomi juurde, s. o. valentselektronid täidavad energianivoosid, mis kuuluvad kogu kristallile tervikuna. Need nn. kollektiviseeritud elektronid võivad liikuda mööda kogu kristalli ühelt aatomilt

teisele, käitudes nagu vabad elektronid. Siiski valitseb elektronide liikumise kohta väga oluline statistiline keeld.

Diskreetsete energianivoode süsteemi asemel, mis iseloomustab vaba aatomit, tekib tahkes kehas N aatomi liitumisel ribade süsteem, kus iga riba vastab vaba aatomi energianivoole, mis on kristallisisese elektrivälja mõjul lõhestunud N alanivooks. Neid ribasid nimetatakse energiatsoonideks. Joonisel 10 on kujutatud tahke keha energiatsoonide tekkimine vabade aatomite nivoodest. Näeme,



Joon. 10. Energiatsoonide tekkimise skeem

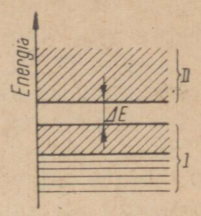
et aatomitevahelise kauguse (r) vähenedes hakkavad aatomite energianivood lõhestuma ja laienema tsoonideks. See protsess kestab seni, kuni aatomid on lähenenud niivõrd, et tekib tahke keha, mille aatomitevaheline kaugus on joonisel tähistatud r_0-ga. Kaugemal asuvad energianivood laienevad vähem kui kõrgemal asuvad nivood.

Tsoonide energeetiline laius on suurusjärgus 1 eV[1], aga nivoodevaheline kaugus tsoonis on väga väike, umbes 10^{-22} eV. Seetõttu võib tsoone vaadelda peaaegu pidevate energianivoode kogumikuna, kusjuures tsooni piirides lähevad elektronid ühelt nivoolt teisele üle väga kergesti, väga väikese energiakuluga. Elektronid võivad tsooni piirides paikneda mistahes nivool, kuid kooskõlas Pauli printsiibiga ühel ja samal nivool samaaegselt mitte rohkem kui kaks elektroni. Tekkivad energiatsoonid on eraldatud üksteisest aladega, mida nimetatakse keelutsoonideks. Ühelgi elektronil ei saa olla energiat, mille suurus vastaks energiale keelutsoonis, samuti nagu üksikus vabas aatomis ei saa elektronil olla energiat, mille väärtus oleks kusagil diskreetsete nivoode vahepeal.

Aine elektrilised ja keemilised omadused määrab põhiliselt

[1] Elektronvolt on energiahulk, mille omandab elektron, kui ta läbib elektrivälja potentsiaalide vahega 1 V. 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J ($1{,}6 \cdot 10^{-12}$ e).

valentselektronide käitumine. Seepärast omab eriti suurt tähtsust valentselektronide põhinivoodest moodustunud nn. valents- ehk põhitsoon. Valentstsoon asub energeetiliselt kõrgemal kõigist sisekihtide elektronide vastavatest tsoonidest. Kuid valentstsooni kohal asub veel ergastatud nivoode tsoon, mis moodustab valentselektronide ergastatud seisundite nivoodest. Viimast nimetatakse ka juhtivustsooniks ehk vabaks tsooniks.



Joon. 11. Leelismetallide energiatsoonide skeem 0°K juures:
I — valentstsoon; *II* — juhtivustsoon

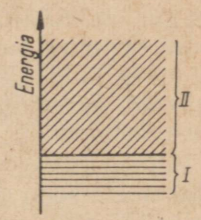
1.3. ELEKTRIJUHTIVUS POOLJUHTIDES

Enamiku elektrijuhtide eritakistus on vahemikus $10^{-4} \ldots 10^{-6}$ Ωcm, isolaatoritel $10^{10} \ldots 10^{18}$ Ωcm; pooljuhtidele jääb niisiis küllaltki suur vahemik — $10^{-4} \ldots 10^{10}$ Ωcm.

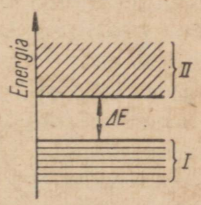
O m a j u h t i v u s. Vaatleme, kuidas seletatakse puhta (lisanditevaba) pooljuhi elektrijuhtivuse mehhanismi tsooniteooria abil.

Absoluutse nulli puhul on valentstsoon osaliselt või täielikult elektronidega täidetud. Kui valentstsoon on täidetud osaliselt (näit. leelismetallide puhul, kus aatomite kõige välimisel hõivatud energianivool on ainult üks elektron), siis jaotuvad elektronid vastavalt energia miinimumi printsiibile kõige madalamate võimalike energianivoode vahel, täites neid täielikult; tsooni ülemises osas olevad nivood jäävad tühjaks (joon. 11). Sel juhul paigutuvad elektronid tsoonis nii, et kõik N elektroni hõivavad $\frac{N}{2}$ madalaima energiaga nivood, ülemised $\frac{N}{2}$ nivood jäävad aga tühjaks. Kui sellisele kehale rakendada elektriväli, kiirendab see elektrone, suurendab nende energiat ja viib nad vabadele, kõrgematele energianivoodele. Seejuures toimub elektronide liikumine ühes suunas (vastupidi elektrivälja suunale), mis ongi elektrivool. Keha elektrijuhtivus on võimalik ainult seetõttu, et valentstsoonis on olemas vabu, elektronide poolt hõivamata energianivoosid.

Seega kui valentstsoon ei ole elektronidega täielikult täidetud ja seal esineb vabu nivoosid, on tegemist elektrijuhiga.



Joon. 12. Osaliselt kattuvate energiatsoonide skeem 0° K juures:
I — valentstsoon; *II* — juhtivustsoon



Joon. 13. Pooljuhi energiatsoonide skeem 0°K juures:
I — valentstsoon; *II* — juhtivustsoon

Kuid elektrijuhiks on ka selline aine, kus valentstsoon on küll täidetud, aga samal ajal ergastatud nivoode tsoon puutub kokku või isegi osaliselt kattub valentstsooniga (joon. 12).

Sel juhul võib kaht kokkupuutuvat või kattuvat tsooni vaadelda kui üht laia tsooni, mis on elektronidega osaliselt täidetud.

Edasi vaatleme tahkeid kristallilisi kehi, millel absoluutse nulli juures on valentstsoon täidetud ning valentstsooni lahutab ergastatud nivoode tsoonist keelutsoon energeetilise laiusega ΔE (joon. 13). Väline elektriväli ei saa sellises kehas esile kutsuda elektrivoolu. Vaatamata elektronide tohutule arvule ja neile mõjuvatele elektrivälja jõududele, ei saa elektronid muuta oma liikumise olukorda, oma energiat, sest pole vabu naabernivoosid, kuhu elektron võiks üle minna. Selles avaldub statistiline keeld elektronide liikumisele: vabade nivoode puudumise tõttu on kõik täidetud tsooni elektronid ühteviisi seotud ja nad ei saa kehas põhjustada elektrijuhtivust. Absoluutse nulli juures on sellised kehad täielikud isolaatorid. Kui aga neile anda energiat väljastpoolt juurde, näiteks tõsta temperatuuri, siis osa elektrone võib omandada energia, mis on küllaldane keelutsooni ületamiseks. Ergastatud nivoode tsooni sattudes muutuvad elektronid niisama vabaks kui juhis olevad elektronid ning nad on võimelised põhjustama keha elektrijuhtivust. Seepärast nimetataksegi ergastatud nivoode tsooni juhtivustsooniks.

Väga oluline on keelutsooni laius. Leidub kristallilisi aineid, mille keelutsoon pole kuigi lai, nii et juba toatemperatuuril on soojusliikumise energia küllaldane selleks, et paisata osa elektrone valentstsoonist juhtivustsooni. Temperatuuri tõusuga selliste elektronide arv ja koos sellega ka kehade elektrijuhtivus suureneb. Kuid on ka väga laia keelutsooniga aineid, millel ei ole kõige kõrgematelgi temperatuuridel märgatavat (joon. 14) elektrijuhtivust (isolaatorid).

Suhteliselt kitsa keelutsooniga ained ongi pooljuhid. Nende ΔE on 0,1 ... 1,5 eV (näiteks germaaniumil ja ränil vastavalt 0,75 ja 1,12 eV). Aineid, mille ΔE on suurem kui 1,5 eV, loetakse isolaatoriteks. Parematel isolaatoritel võib ΔE olla üle 10 eV.

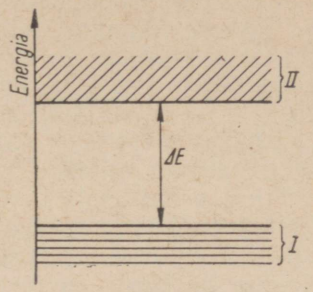
Nagu näha, on erinevus juhtide, pooljuhtide ja isolaatorite vahel põhiliselt kvantitatiivset laadi ja oleneb keelutsooni laiusest ΔE.

Pooljuhtidele võib nüüd anda järgmise definitsiooni: pooljuhid on ained, millel ergastamata seisundis (absoluutse nulli juures) valentstsoon on täidetud, juhtivustsoon täiesti tühi ja keelutsooni laius on mõnest kümnendikust kuni poolteise elektronvoldini.

Osa elektronide siirdumisel täidetud valentstsoonist juhtivustsooni muutub oluliselt valentstsooni jäänud elektronide olukord: nende liikumine ei ole enam takistatud vabade nivoode puudumisega nagu varem. Nüüd võivad vabadele nivoodele üle minna naa-

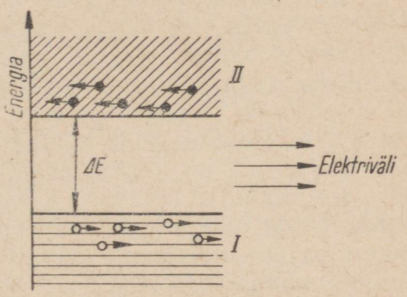
berelektronid. Vabu nivoosid valentstsoonis nimetatakse aukudeks.

Kui rakendada pooljuhile väline elektriväli, hakkavad elektronid valentstsoonide nivoode vahel ümber jaotuma nii, et see vastab elektronide liikumisele vastu elektrivälja suunda (kokkuleppeliselt loetakse elektrivälja suunaks positiivsete laengute liikumise suunda. Elektronid kui negatiivsed laengud liiguvad seetõttu vastupidiselt elektrivälja suunale). Selline ümberjaotumine on võimalik ainult vabade nivoode aukude olemasolu tõttu valentstsoonis. Niipea kui auk täitub mõne naabernivool asuva elektroniga, jääb viimase kohale uus auk. Selle täidab uuesti mõni teine elektron, mille kohale tekib juba kolmas auk, jne. Seda aukude tekkimise ja täitumise protsessi võib käsitada lihtsustatult üheainsa augu liikumisena.



Joon. 14. Isolaatori energiatsoonide skeem:
I — valentstsoon; *II* — juhtivustsoon

On arusaadav, et kui elektronid liiguvad elektriväljas vastupidiselt välja suunale, siis peavad augud liikuma välja suunas (joon. 15).



Joon. 15. Elektronide ja aukude liikumine pooljuhis

Seega käituvad augud nii, nagu kannaksid nad positiivset, laengut. Tõepoolest, kui elektron lahkus mingilt kohalt kristallivõres ja selle tagajärjel tekkis seal auk, siis on see nähtus samaväärne positiivse laengu tekkimisega antud kohas. Seejuures ei tohi unustada, et reaalselt on pooljuhis laengukandjateks elektronid, auk on aga ainult fiktiivne mõiste, mis on loodud pooljuhtides kulgevate protsesside hõlpsamaks kirjeldamiseks.

Vastavalt aukude ja elektronide liikumisele tekib pooljuhis välise elektrivälja mõjul korraga kaks erinevat voolu: aukvool ja elektronvool. Pooljuhis tekkiv koguvool on võrdne kahe komponendi, s. o. elektron- ja aukvoolu summaga, täpselt samuti nagu elektrolüüsi puhul vastasmärgiliselt laetud ioonide (anioonide ja katioonide) vastassuunaline liikumine tekitab kaht liiki voolu ning nende voolude summa annab elektrolüüti läbiva koguvoolu.

Ideaalselt puhta pooljuhi elektrijuhtivust nimetatakse omajuhtivuseks. Katsed näitavad, et mida puhtam, lisanditevaesem on pooljuht, seda väiksem on tema juhtivus ja seda suurem on tema eritakistus. Väga puhta germaaniumi monokristalli eritakistus on 60 Ωcm.

Lisandjuhtivus. Katsed näitavad, et reaalsete pooljuhtide elektrijuhtivus on tegelikult palju suurem nende omajuhtivusest. Põhjus peitub selles, et reaalsed pooljuhid ei ole kunagi ideaalselt korrapärase struktuuriga. Pooljuhi kristallivõre ranget perioodilisust rikuvad peamiselt lisandid — teiste ainete aatomid, mida leidub ka hästi puhastatud pooljuhtides. Mikroskoopiline hulk lisandeid võib pooljuhi elektrijuhtivust suurendada tuhandeid ja isegi miljoneid kordi. Kui näiteks ideaalselt puhtale germaaniumile lisada 10^6 germaaniumi aatomi kohta 1 aatom antimoni, väheneb germaaniumi eritakistus 1000 korda.

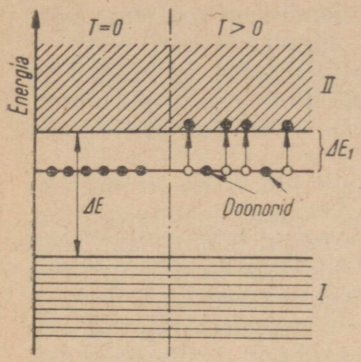
Isegi ideaalselt puhtas pooljuhis esinevad ikkagi mitmesugused soojusliikumisest tingitud kristallivõre defektid (näiteks on mõni aatom võresõlmest välja löödud).

Lisandi aatomid paiknevad pooljuhis korrapäratult ja on üksteisest nii kaugel, et nende vastastikune mõju praktiliselt puudub. Sel juhul ei laiene lisandi aatomite valentselektronide nivood tsoonideks nagu põhiainel, vaid jäävad diskreetseteks nagu vabades aatomiteski. Selle tagajärjel esinevad reaalsetes pooljuhtides kogu kristallile kuuluvate põhiaine energiatsoonide kõrval ka üksikud diskreetsed, nn. lokaalsed nivood, mis kuuluvad igaüks eraldi oma lisandiaatomi juurde. Kõige olulisem on asjaolu, et need lisandinivood paiknevad tavaliselt parajasti põhiaine keelutsoonis. Lisandi valentselektronid jäävad oma aatomitega seotuks ega saa rännata mööda kristalli. Kuid lisandi elektrone on võimalik oma aatomitest võrdlemisi kergesti lahti kiskuda, kui anda elektronidele energiat väljastpoolt juurde (näiteks tõsta pooljuhi temperatuuri).

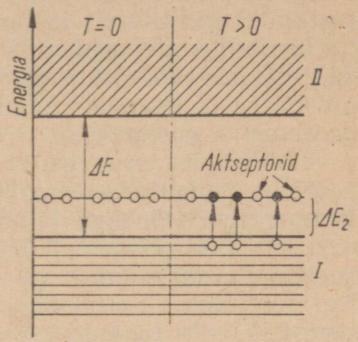
Lisandite nivoode esinemine keelutsoonis vähendab selle energeetilist laiust ΔE. Elektronide viimiseks lisandinivoodelt juhtivustsooni või valentstsoonist lisandinivoodele kulub palju vähem energiat kui kogu keelutsooni ületamiseks.

Lisandite juures pakuvad huvi kaks järgmist juhtu.

1. Lisandinivoo asub juhtivustsooni põhja lähedal. Ergastuse puudumisel (temperatuuri absoluutse nulli juures) asuvad sellel kitsal nivool lisandi kõigi aatomite valentselektronid. Seega on lisandinivoo täielikult täidetud (joon. 16, $T = 0$). Absoluutsest nullist kõrgematel temperatuuridel võib soojusliikumine paisata neid elektrone oma nivoolt juhtivustsooni (joon. 16, $T > 0$), teiste sõnadega, elektronid rebitakse lahti lisandi aatomitest ja, läinud juhtivustsooni, võivad rännata vabalt mööda kogu kristalli. Selleks vajalikku energiat ΔE_1 nimetatakse aktivatsioonienergiaks. See võib olla mitu korda väiksem kui energia ΔE, mis on vajalik



Joon. 16. Doonorlisanditega pooljuhi energiatsoonide skeem



Joon. 17. Aktseptorlisanditega pooljuhi energiatsoonide skeem

omajuhtivuse tekitamiseks. Näiteks germaaniumil on aktivatsioonienergia umbes 0,03 eV, keelutsooni laius aga 0,75 eV, seega 25 korda suurem. Seetõttu võib teatud tingimustel lisandinivoolt juhtivustsooni paisatud elektrone olla palju rohkem kui otseselt põhiaine valentstsoonist juhtivustsooni pääsenud elektrone. On ilmne, et sel korral on ka lisandjuhtivus (s. o. lisanditest tingitud juhtivus) palju suurem kui pooljuhi omajuhtivus, kusjuures pooljuhi kogujuhtivus suureneb väga tugevasti, võrreldes puhta, lisanditeta pooljuhi juhtivusega.

Lisandite nivoosid, mis absoluutse nulli juures on täielikult täidetud ja mis ergastuse mõjul annavad oma elektrone juhtivustsooni, nimetatakse doonornivoodeks, lisandeid endid aga doonoriteks (ladinakeelsest sõnast *donare* — annetama, andma). Nagu nägime, põhjustavad doonorid pooljuhis elektronjuhtivust. Elektronjuhtivusega pooljuhte nimetatakse ka *n*-tüüpi pooljuhtideks (sõnast «negatiivne»), sest elektrijuhtivust põhjustavad siin negatiivselt laetud osakesed — elektronid.

2. Lisandinivoo asub valentstsooni lähedal ja on absoluutse nulli juures tühi (joon. 17, $T = 0$). Soojusliikumine põhjustab sel juhul elektronide üleminekut valentstsoonist vabale lisandinivoole (joon. 17, $T > 0$). Kui aktivatsioonienergia ΔE_2 on mitu korda väiksem põhiaine keelutsooni energeetilisest laiusest ja temperatuur on küllalt madal, nii et elektronide üleminek valentstsoonist otseselt juhtivustsooni on vähe tõenäoline, siis on laengukandjateks ainult valentstsoonis tekkinud augud. Elektronid, mis paisati lisandinivoole, haaratakse lisandi aatomite poolt ega saa seetõttu osa võtta elektrijuhtivusest. Sellisel pooljuhil on aukjuhtivus. Aukjuhtivusega pooljuhte nimetatakse teisiti veel *p*-tüüpi

pooljuhtideks (sõnast «positiivne»), sest nendes on juhtivuse põhjustajaiks positiivselt laetud osakesed — augud.

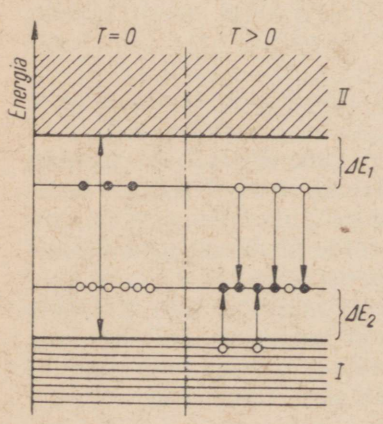
Lisandite nivoosid, mis absoluutse nulli juures on tühjad ja mis «haaravad» elektrone valentstsoonist, nimetatakse aktseptornivoodeks ja lisandeid endid aktseptoriteks (ladinakeelsest sõnast *acceptor* — vastuvõtja).

Ülalöeldust on selge, et absoluutse nulli juures on lisanditega pooljuht isolaator, sest temas puuduvad vabad laengukandjad. Temperatuuri tõusuga ja välise ergastuse mõjul tekib lisandjuhtivus, kusjuures olenevalt lisandi liigist tekib kas elektronjuhtivus (doonorlisandi puhul) või aukjuhtivus (aktseptorlisandi puhul). Kui pooljuhisse on korraga sisse viidud nii doonoreid kui ka aktseptoreid, siis toimub lisandite kompensatsioon: doonorite elektronid lähevad üle aktseptorite nivoole ja juhtivuse tüübi määrab pooljuhis ülekaalus olev lisand (näiteks joonisel 18 kujutatud juhul on selleks aktseptorlisand). Aktseptorite aatomid haaravad doonori aatomitega nõrgalt seotud elektronid ja seovad viimaseid palju tugevamini. Sellised elektronide üleminekud on tingitud üldkehtivast energia miinimumi printsiibist, mille järgi tasakaaluolukorras (s. o. välise ergastuse puudumisel) elektronid hõivavad kõige madalamaid võimalikke nivoosid. Et aktseptornivood on energeetiliselt doonornivoodest madalamal, siis doonoritelt vabanenud elektronid püüavad laskuda täitmata aktseptornivoodele.

Seega kui viia pooljuhisse üht või teist lisandit ja arvestada eri liiki lisandite kompensatsiooni, osutub võimalikuks teadlikult reguleerida pooljuhtide juhtivuse suurust ja juhtivuse tüüpi, mis võimaldab tehnikas valmistada vajalike omadustega pooljuhtseadiseid.

Elektrijuhtivuse sõltuvus temperatuurist. Eelnevast on selge, et mittemetallilist struktuuri omavate tahkete kehade — pooljuhtide — elektrijuhtivus on määratud aktivatsioonienergia ja temperatuuriga.

Absoluutse nulli juures on kõik elektronid seotud oma aatomitega, mis moodustavad pooljuhtmaterjali kristallivõre. Koos temperatuuri tõusuga vabaneb osa elektrone kovalentsetest sidemetest, kuna



Joon. 18. Pooljuhi energiatsoonide skeem doonor- ja aktseptorlisandi üheaegsel esinemisel

soojuslike fluktuatsioonide energia osutub suuremaks antud puhta pooljuhi aktivatsioonienergiast. Järelikult kasvab vabade elektronide arv, mis on võimelised paigutuma ümber välise elektrivälja mõjul, s. o. osa võtma elektrijuhtivusest. Seega temperatuuri tõusmisel jooljuhi elektrijuhtivus kasvab.

Kui pooljuhis on doonor- või aktseptorlisandeid, siis ei ole absoluutse nulli juures ühtki vaba elektroni või auku. Temperatuuri tõustes vabanevad esimestena kovalentsest sidemest lisandi aatomi elektronid, kuna lisandi aktivatsioonienergia on palju väiksem põhiaine aatomite aktivatsioonienergiast. Temperatuuri edasine tõstmine viib selleni, et kõik lisandi aatomid ioniseeruvad ja alles pärast seda tekib pooljuhtmaterjali omajuhtivus.

Järelikult domineerib madalatel temperatuuridel pooljuhis lisandjuhtivus ja kõrgematel temperatuuridel omajuhtivus. Siiski jääb elektrijuhtivuse temperatuurisõltuvuse iseloom lisanditega pooljuhis endiseks: temperatuuri tõustes suureneb pooljuhi elektrijuhtivus. Tsooniteooria järgi seletatakse seda järgmiselt.

Mida suurem on keelutsooni energeetiline laius ΔE, seda rohkem energiat peab saama elektron, et üle minna valentstsoonist juhtivustsooni, ja järelikult seda kõrgema temperatuurini tuleb pooljuhti kuumutada.

Absoluutse nulli juures ei erine lisanditega pooljuhi elektronide olekud juhtivus- ja valentstsoonis millegagi puhta pooljuhi olekutest. Lisanditega pooljuhi keelutsoonis asuvad lisandi lokaalsed nivood; doonornivood on täielikult täidetud ja ei anna oma elektrone juhtivustsooni, aktseptornivood on aga tühjad ja elektronid valentstsoonist neile ei paisku.

Temperatuuri tõustes annavad doonorid oma elektronid juhtivustsooni. See toimub seda intensiivsemalt, mida kõrgem on temperatuur. Doonorite ja aktseptorite aatomite aktivatsioonienergiad ΔE_1 ja ΔE_2 on väiksemad kui põhiaine aktivatsioonienergia, mistõttu kindlas temperatuurivahemikus ilmneb põhiliselt lisandjuhtivus, kõrgematel temperatuuridel aga omajuhtivus. Siit järgneb, et lisanditega pooljuhi elektrijuhtivuse temperatuurisõltuvus peab koosnema kahest komponendist:

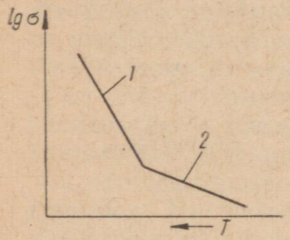
$$\sigma = \sigma_C + \sigma_L,$$

kus σ_C on omajuhtivus,
σ_L — lisandjuhtivus.

Madalatel temperatuuridel on σ_C praktiliselt võrdne nulliga, s. o. elektronid ei ole võimelised ületama keelutsooni ΔE, see-eest ületavad nad aga kergelt tsooni ΔE_1. Nimelt lisandjuhtivus määrab madalatel temperatuuridel kogu pooljuhi elektrijuhtivuse. Temperatuuri tõustes hakkab mõjuma omajuhtivus, kuna elektronid valentstsoonis omandavad küllaldaselt soojuslikku energiat

juhtivustsooni paiskumiseks. Kuid esialgu avaldab lisandjuhtivus siiski veel märgatavat mõju kogu elektrijuhtivusele.

Temperatuuri edasine tõstmine viib lisandinivoode tühjaksammutamisele, s. o. neil ei ole edaspidi enam anda elektrone juhtivustsooni. Järelikult määrab kõrgetel temperatuuridel pooljuhi elektrijuhtivuse põhiliselt omajuhtivus. Joonisel 19 on kujutatud graafiliselt lisanditega pooljuhi erijuhtivuse sõltuvus temperatuurist. Lõik *1* vastab omajuhtivusele ja lõik *2* lisandjuhtivusele (σ on erijuhtivus).



Joon. 19. Pooljuhi elektrijuhtivuse temperatuurisõltuvus

Laengukandjate liikuvus. Ükskõik millise aine elektrijuhtivus kasvab elektrivälja mõjul liikuvate laengukandjate kontsentratsiooni ja kiiruse suurenedes, aga samuti laengukandjate laengu suurenedes. Laengukandjad võivad seejuures olla nelja liiki: elektronid ja augud tahketes kehades ning anioonid ja katioonid vedelikes ning gaasides.

Iga aine erijuhtivus määratakse:

$$\sigma = en\mu,$$

kus e on laengukandjate laengu suurus,
n — laengukandjate kontsentratsioon aines,
μ — laengukandjate liikuvus.

Liikuvus iseloomustab laengukandjate liikumisvõimet elektrivälja mõjul. Suuruselt on ta võrdne laengukandjate liikumise kiirusega, mille viimased saavad väljatugevuse 1 V/cm korral. Siit järgneb, et liikuvus

$$\mu = \frac{V}{E},$$

kus V on osakeste liikumise kiirus elektriväljas $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$,

E — elektrivälja tugevus $\frac{\text{V}}{\text{cm}}$.

Laengukandjate liikuvus sõltub pooljuhtmaterjali kristallivõre tüübist ja keemilisest koostisest, samuti kristallivõre defektide tihedusest, kuna viimased hajutavad laengukandjaid. Hajumine aga tähendab laengukandjate kiiruse suuruse ja suuna muutumist nende korduvate kokkupõrgete tagajärjel kristallivõre defektidega.

Liikuvuse järgi võib hinnata pooljuhtmaterjali puhtust ja kristallivõre ideaalsuse astet.

Lisandid kahjustavad kristallivõre perioodilist struktuuri ja seepärast vähendavad laengukandjate liikuvust.

Enamikul pooljuhtidel on elektronide liikuvus suurem aukude liikuvusest, millega on samuti seletatav elektronjuhtivuse ülekaal omajuhis.

1.4. *p-n*-SIIRE

p-n-siirde tekkimine. Paljude pooljuhtseadmete tööprintsiip põhineb nähtustel, mis ilmnevad kahe erineva juhtivustüübiga pooljuhi kokkupuutekohal.

Vaatleme kahest pooljuhist koosnevat süsteemi, millest ühel on *p*-tüüpi juhtivus ja teisel *n*-tüüpi juhtivus (joon. 20, *a*).

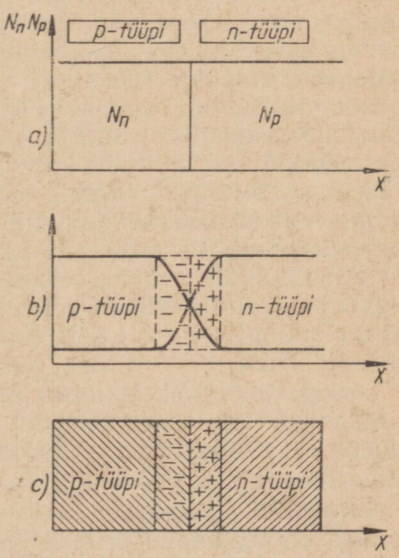
Lihtsuse mõttes loeme, et doonorite kontsentratsioon N_n *n*-tüüpi pooljuhis on võrdne aktseptorite kontsentratsiooniga N_p *p*-tüüpi pooljuhis.

Ioniseeritud lisandiaatomid on liikumatud, s. t. kristallis on olemas mitteliikuvad positiivsed (doonorid) ja negatiivsed (aktseptorid) laengud.

Pooljuhi *p*-piirkonnas on suur aukude kontsentratsioon ja *n*-piirkonnas elektronide kontsentratsioon, kuid sellele vaatamata on nii *n*-piirkond kui ka *p*-piirkond elektriliselt neutraalsed, sest liikuvate aukude ja elektronide laengud kompenseeritakse mitteliikuvate ioniseeritud lisandiaatomite poolt. Niisugune olukord esineb alates teatud kaugusest kahe pooljuhi kokkupuutepinnast, kontakti vahetus läheduses aga olukord muutub märgatavalt.

Vaatleme nähtusi, mis toimuvad kahe erineva juhtivustüübiga pooljuhi kokkupuutepinna vahetus läheduses.

Aukude kontsentratsioon *p*-piirkonnas (enamus-laengukandjad) on palju suurem kui *n*-piirkonnas (kus nad on vähemus-laengukandjateks) ja sellepärast augud, püüdes võrdsustada oma kontsentratsiooni kogu pooljuhis, difundeeruvad *n*-piirkonda. Difundeerunud aukude kontsentratsioon *n*-piirkon-



Joon. 20. *p-n*-siirde tekkimine

nas väheneb koos kauguse suurenemisega kontakti pinnast, kuna nad rekombineeruvad *n*-piirkonna enamus-laengukandjate — elektronidega.

Üheaegselt aukude difusiooniga *p*-piirkonnast *n*-piirkonda toimub elektronide difusioon, kusjuures viimased liiguvad *n*-piirkonnast *p*-piirkonda. Difundeerunud elektronide kontsentratsioon *p*-piirkonnas kahaneb samuti koos kauguse suurenemisega kontaktist tänu nende rekombineerumisele enamus-laengukandjate — aukudega.

Joonisel 20, *b* on kujutatud elektronide ja aukude kontsentratsiooni jaotus *n*- ja *p*-piirkonnas. Joonisel tähistab punktiirjoon kontakti puudumist kahe piirkonna vahel ja pideva joonega on märgitud, kui kaks pooljuhti on viidud kokkupuutesse.

Elektronide difusiooni tõttu *n*-piirkonnast *p*-piirkonda väheneb nende kontsentratsioon *n*-piirkonnas kontaktipinna vahetus läheduses. Lisaks sellele *p*-piirkonnast *n*-piirkonda üleläinud augud rekombineeruvad osaliselt vahetult kontaktipinna läheduses olevate *n*-piirkonna elektronidega. Nende protsesside tulemusena väheneb elektronide kontsentratsioon *n*-piirkonnas vahetult pooljuhtide kokkupuutepinna läheduses ja järelejäänud elektronide laeng ei suuda enam kompenseerida mitteliikuvate doonorlisandite ioonide positiivset laengut. Seepärast moodustub *n*-piirkonnas kahe piirkonna kokkupuutepinna vahetus läheduses positiivne laeng, mis koosneb *n*-piirkonna enamus-laengukandjate — elektronide poolt kompenseerimata doonorlisandite mitteliikuvate ioonide positiivsetest laengutest.

Analoogilised nähtused toimuvad *p*-piirkonnas: aukude difusioon *p*-piirkonnast *n*-piirkonda vähendab nende kontsentratsiooni *p*-piirkonnas (kontaktipinna läheduses); *n*-piirkonnast difundeeruvate elektronidega rekombineerumine vähendab aukude kontsentratsiooni kontakti läheduses veelgi. Kontaktipinna läheduses *p*-piirkonda jäävate aukude positiivne laeng ei kompenseeri enam täielikult aktseptorlisandi mitteliikuvate ioonide negatiivset laengut. Seepärast kujuneb kahe pooljuhi kokkupuutepinna vahetus läheduses *p*-tüüpi pooljuhis negatiivne laeng, mis koosneb *p*-piirkonna enamus-laengukandjate — aukude poolt kompenseerimata aktseptorlisandite mitteliikuvate ioonide negatiivsetest laengutest.

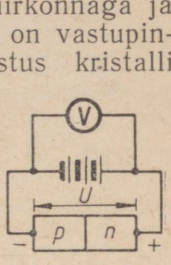
Liikumatud kompenseerimata laengud loovad kahe pooljuhi kokkupuutepinna vahetus läheduses kitsa elektrivälja piirkonna välja suunaga positiivselt laetud doonoritelt negatiivselt laetud aktseptoritele, s. o. *p*-tüüpi pooljuhist *n*-tüüpi pooljuhti.

Seega tekib kahe erineva juhtivustüübiga pooljuhi kokkupuutepinna vahetus läheduses kitsas ruumilaengu piirkond, mis on vaene liikuvatest laengukandjatest ja koosneb mitteliikuvate ioonide laengutest (joon. 20, *c*).

Ruumilaengu piirkonnal, mis on vaene liikuvatest laengukandjatest, on ülejäänud kristalliga võrreldes tunduvalt suurem takis-

tus ja seepärast nimetatakse seda ka tõkkekihiks. Tõkkekihi paksus kõigub mõnest kümnendikust kuni mõnekümne mikromeetrini sõltuvalt doonorite ja aktseptorite kontsentratsioonist siirde läheduses. Süsteemi, mis koosneb kahest erinevat tüüpi juhtivust omavast pooljuhist, mis on omavahel eraldatud tõkkekihiga, nimetatakse elektron-auk-siirdeks ehk lühidalt *p-n*-siirdeks.

V o o l l ä b i *p-n*-s i i r d e. Kui *p-n*-siirdele rakendada pinge U (joon. 21) nii, et plusspoolus on ühendatud *n*-piirkonnaga ja miinuspoolus *p*-piirkonnaga, siis sel juhul *p-n*-siire on vastupingestatud. Kuna pooljuhtmaterjali elektriline takistus kristalli sees on *p-n*-siirde takistusega võrreldes kaduvväike, siis pinge langeb põhiliselt tõkkekihile, kusjuures antud polaarsuse korral välimine elektriväli liitub tõkkekihi väljaga, kuna nad on samasuunalised. Tõkkekihi välja nimetatakse harilikult potentsiaalibarjääriks. Väljade liitumise tõttu tõkkekihi «tõukav» mõju enamus-laengukandjate jaoks kasvab, see aga põhjustab potentsiaalibarjääri suurenemist ning viib tõkkekihi laienemisele. Sellepärast enamus-laengukandjate vool läbi *p-n*-siirde väheneb või katkeb hoopis kuna *p*-piirkonnas olevad vabad augud ja *n*-piirkonnas olevad vabad elektronid ei ole võimelised ületama suurenenud potentsiaalibarjääri. Suurenenud potentsiaalibarjäär aga ei ole takistuseks vähemus-laengukandjate liikumisele läbi *p-n*-siirde, vaid vastupidi, see soodustab nende liikumist. Läbi ruumilaengu piirkonna minevate vähemus-laengukandjate arv sõltub nende kontsentratsioonist *p*- ja *n*-tüüpi pooljuhis ning teoreetiliselt ei sõltu *p-n*-siirdele rakendatud vastupingest.



Joon. 21. Vastupingestatud *p-n*-siire

Vaatamata sellele, et suurenenud potentsiaalibarjäär hakkab tugevamini tõmbama vähemus-laengukandjaid ja kiirendama nende liikumist, nende vool läbi *p-n*-siirde ei muutu, kuna *p-n*-siiret läbivate vähemus-laengukandjate hulk ei sõltu pingest, vaid kontsentratsioonist ja soojusliku kaootilise liikumise tulemusena *p-n*-siirde lähedusse jõudnute arvust. Seda vähemus-laengukandjate poolt põhjustatud pingest sõltumatut voolu tähistatakse I_0-ga ja nimetatakse *p-n*-siirde küllastusvooluks (ka triivvooluks). *p-n*-siirde küllastusvool koosneb *p*-piirkonnast *n*-piirkonda siirduvate elektronide voolust (I_{n0}) ja *n*-piirkonnast *p*-piirkonda siirduvate aukude voolust (I_{p0}).

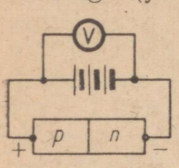
$$I_0 = I_{p0} + I_{n0}$$

Voolud I_{n0} ja I_{p0} on võrdelised vastavalt *p*-pooljuhi ja *n*-pooljuhi eritakistustega ja pöördvõrdelised laengukandjate eluigade τ_n ja τ_p-ga. Kristalli temperatuuri tõstmisel suureneb elektron-aukpaaride genereerimine, s. o. suureneb enamus- ja vähemus-laengukandjate kontsentratsioon, kuid enamus-laengukandjad tõuga-

takse elektrivälja poolt *p-n*-siirdest kaugemale ja nad ei saa läbida tõkkekihti. See-eest aga põhjustab vähemus-laengukandjate kontsentratsiooni suurenemine triivvoolu I_0 suurenemist. Näiteks germaaniumil suureneb I_0 kaks korda, kui temperatuur tõuseb 10° C võrra.

Seega voolu suurus läbi *p-n*-siirde joonisel 21 antud polaarsuse puhul ei sõltu rakendatud pinge suurusest. Niisugust voolusuunda nimetatakse tagasi- ehk tõkkesuunaks ja voolu ennast tagasi- ehk vastuvooluks.

Kui ühendada *p-n*-siire pingeallikaga selliselt, et vooluallika plussklemm oleks ühendatud *p*-piirkonnaga ja miinusklemm *n*-piirkonnaga (joon. 22), siis on nähtused vastupidised. Väline elektriväli on sel juhul suunatud tõkkekihi väljale vastu. Siis suureneb aukude kontsentratsioon kontakti lähedal *p*-piirkonnas ja elektronide kontsentratsioon kontakti lähedal *n*-piirkonnas. See aga vähendab potentsiaalibarjääri kõrgust ja tõkkekihi paksust.



Joon. 22. Päripingestatud *p-n*-siire

Suure hulga enamus-laengukandjate tõttu, mis võivad nüüd ületada alanenud potentsiaalibarjääri, suureneb enamus-laengukandjate vool läbi *p-n*-siirde. Välise pinge edasisel suurendamisel tõkkekiht kaob, kuna kogu ruumilaeng kompenseeritakse vabade aukude ja elektronide laengute poolt, ja siirdetakistus saab võrdseks pooljuhtmaterjali mahutakistusega. *p-n*-siiret läbiva voolu suurus määratakse sel juhul pooljuhtmaterjali takistuse ja välise ahela takistusega. *p-n*-siirdele rakendatud päripinge puhul esinevat voolu nimetatakse pärivooluks, pärivoolu suunda aga pärisuunaks.

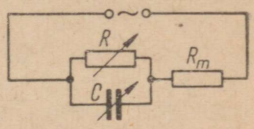
p-n-siirde omaduste sõltuvus temperatuurist ja sagedusest. Nagu eespool märgitud, on lisanditeta pooljuht absoluutse nulli juures isolaator. Lisandpooljuht on absoluutse nulltemperatuuri juures samuti isolaator, kuid lisandite väiksema aktivatsioonienergia tõttu omandab ta juba kaunis madalatel temperatuuridel küllaldase juhtivuse. Seetõttu võiks *p-n*-siire töötada väga madalatel temperatuuridel. Tehnoloogilistel ja konstruktiivsetel põhjustel loetakse pooljuhtseadiste alumiseks temperatuuripiiriks —60° C.

Temperatuuri tõusuga saavad elektronid suurema energia ja omajuhtivus suureneb. Lisanditest tingitud juhtivus sõltub samuti teataval määral temperatuurist, kuid mingi temperatuuri juures on lisandid ära andnud kõik oma laengukandjad ja temperatuuri edasise tõusuga lisandjuhtivus enam ei suurene. Samal ajal aga suureneb pidevalt omajuhtivuse laengukandjate arv, kuni omajuhtivus saab suuremaks lisandjuhtivusest. Sellises olukorras kaob erinevate pooljuhtide vaheline potentsiaalibarjäär ja kaob ka *p-n*-siire koos ventiiliomadustega. Toodud põhjustel on germaa-

niumi puhul *p-n*-siirde maksimaalseks töötemperatuuriks 80 ... 100° C ja räni puhul 160 ... 180° C.

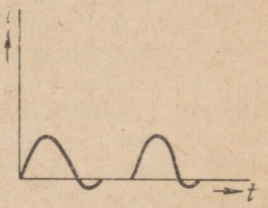
Kirjeldatud nähtus avaldub *p-n*-siiret läbiva vastuvoolu suurenemises temperatuuri tõusmisel.

Kui *p-n*-siirdele on rakendatud vahelduvpinge, siis tema omadused sõltuvad kasutatud pinge sagedusest. Sageduse mõju saab selgitada joonisel 23 toodud *p-n*-siirde aseskeemi abil. Toodud skeemis kujutab R_m pooljuhtmaterjali takistust, R *p-n*-siirde takistust ja mahtuvus C *p-n*-siirde mahtuvust. Mahtuvus koosneb omakorda kahest osast: tõkkekihi mahtuvusest, mis on tingitud *p-n*-siirde läheduses paiknevatest mitteliikuvatest erimärgilistest laengutest ja difusioonmahtuvusest, mis on tingitud töö käigus difundeeruvate laengukandjate kontsentratsiooni muutustest. Lihtsustatult võib neid vaadelda ühise mahtuvusena.



Joon. 23. *p-n*-siirde aseskeem

Kuna sõltuvalt rakendatud pingest muutub tõkkekihi paksus ja difundeeruvate laengukandjate kontsentratsioon, siis muutub koos sellega ka *p-n*-siirde mahtuvus. Rakendatava pinge sageduse tõusmisel hakkab avalduma mahtuvuse šunteeriv mõju, mis avaldub vastupingerežiimis, kus siirdetakistus väheneb mahtuvusjuhtivuse suurenemise tõttu.



Joon. 24. *p-n*-siirde läbinud vahelduvvoolu kuju

Teiseks sagedust piiravaks teguriks on *p-n*-siirde inerts. Kui *p-n*-siirdele mõjub päripinge, siis tõkkekiht puudub. Kui aga rakendatud pinge muudab polaarsust, siis tekib tõkkekiht. Tõkkekihi tekkimine ei toimu momentaanselt, vaid alles mõne hetke möödumisel. Kuna tõkkekiht ei ole veel kujunenud, siis läbib siiret vool ka negatiivse poolperioodi algul (joon. 24).

Kirjeldatud nähtus avaldub kõrgetel sagedustel vastuvoolu suurenemisena. Aega, mis kulub tõkkekihi taastamiseks pinge polaarsuse muutumisel, nimetatakse taastumisajaks ning selleks loetakse aega, mille jooksul vastutakistus saavutab 90% oma lõppväärtusest pärast ümberlülitamist päripingelt vastupingele.

2. POOLJUHTSEADISED

2.1. POOLJUHTDIOODID

Konstruktsioon ja liigitus. Pooljuhtdiood kujutab endast hermetiseeritud korpusesse paigutatud *p-n*-siirdega pooljuhtkristalli, millega on ühendatud elektroodid ja väljaviigud. Pooljuhtdioode liigitatakse mitmeti. Sõltuvalt *p-n*-siirde kujundusest on olemas punkt- ja pinddioodid. Punktdioodi saamiseks võetakse *n*-juhtivusega pooljuhtkristall (joon. 25), mille vastu paigutatakse terav volframnõel. Kui nüüd läbi nõela ja kristalli juhtida sobiv vooluimpulss, tekib teraviku ümber *p*-juhtivusega tsoon ning saame *p-n*-siirde. On ilmne, et selliselt saadav siirdepind ja seega lubatav pärivool on väiksed. Samuti on väike ka *p-n*-siirde mahtuvus.

Pinddioodi saamiseks tekitatakse *n*-juhtivusega pooljuhtkristallis vastavate lisandite sisseviimise teel *p*-juhtivusega tsoon. Näiteks germaaniumpinddioodi saamiseks võetakse *n*-juhtivusega germaaniumikristall (joon. 26), millele paigutatakse tükike indiumi (aktseptor). Seejärel paigutatakse kristall koos indiumiga ahju temperatuuriga 500 . . . 550° C. Seal indium sulab. Sulaindium lahustab germaaniumi ja hiljem tekib rekristalliseerumisel *p*-juhtivusega tsoon. Suurema siirdepinna tõttu on pinddioodile lubatav pärivool ja vastupinge suuremad.

Pooljuhtdioode liigitatakse ka sõltuvalt kasutatud materjalist, sest dioodi omadusi mõjutab väga tugevasti lähtematerjal. Nii on kasutusel germaaniumdioodid, ränidioodid, seleendioodid ja vaskoksiid- e. kuproksdioodid.

Kõige levinum on aga liigitus kasutusalade järgi:

1) alaldusdioodid;
2) kõrgsagedusdioodid;
3) ülikõrgsagedusdioodid;
4) eriotstarbelised dioodid.

Alaldusdiood. Alaldusdioode kasutatakse vahelduvvoolu alaldamiseks. Kuna alaldatud voolud on tavaliselt suured, siis kasutatakse eranditult pinddioode. Sõltuvalt tüübist võivad nende

pärivoolud ulatuda mitmesaja amprini. Vastuvool sõltub pärivoolust ja on maksimaalselt mõni milliamper.

Vaatleme, kuidas toimub dioodi abil vahelduvvoolu alaldamine.

Joonisel 27 on toodud skeem, mis koosneb toiteallikast — vahelduvpingegeneraatorist, millega on järjestikku ühendatud diood ja takisti R_c. Generaatorist saadava voolu suund muutub sõltuvalt ajast (joon. 28, *a*).

Vaatleme, kuidas muutub vool, läbides ahela takistust. Kogu ahela takistus

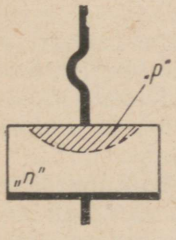
$$R = R_c + R_{diood}.$$

Olgu mingil ajamomendil rakendatud pinge dioodile nii, et *p-n*-siire on vastupingestatud. See tähendab, et dioodi takistus on suur ja järelikult on suur ka kogu ahela takistus. Sel ajamomendil määratakse voolu suurus järgmisest avaldisest:

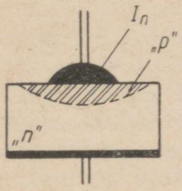
$$I = \frac{U}{R_c + R_{diood}},$$

kusjuures $R_{diood} \gg R_c$ ja takistust R_c ei ole vaja arvestada. Seega

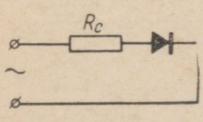
$$I = \frac{U}{R_{diood}}.$$



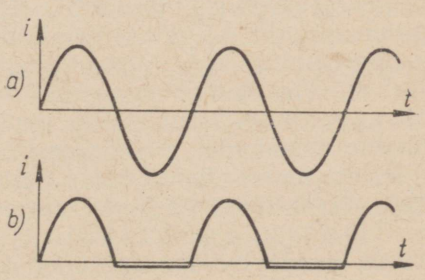
Joon. 25. Punktdiood



Joon. 26. Pinddiood



Joon. 27. Vahelduvvoolu alaldamine pooljuhtdioodiga



Joon. 28. Alaldamata (*a*) ja alaldatud (*b*) voolu graafikud

Dioodi vastutakistus on tavaliselt suurusjärgus mitu megaoomi, mistõttu kogu ahela vool on äärmiselt väike.

Kui diood on päripingestatud, siis ahela vool määratakse samuti valemist $I = \frac{U}{R + R_{diood}}$, kuid sel juhul, nagu varem selgus, on dioodi takistus väike. $R_c \gg R_{diood}$ ja dioodi takistuse võib jätta arvestamata ning kogu vool ahelas avaldub järgmiselt:

$$I = \frac{U}{R_c}.$$

Seega voolu suurus ahelas määratakse ainult koormustakistuse R_c suurusega. Järelikult vool, mis läbib takistit R_c muutub ajas joonisel 28, *b* kujutatud kõvera kohaselt.

Jooniselt on näha, et kui dioodile on rakendatud vastupinge, siis läbib takistit väga väike vool, ja vastupidi, kui dioodile on rakendatud päripinge, siis on ahelas suur vool, mille suurus on määratud ainult takistusega R_c.

Seega laseb diood voolu läbi ainult ühes suunas, s. o. tal on alaldavad omadused.

Nagu eespool toodust selgub, peab dioodil olema suur vastutakistus R_v ja väike päritakistus R_p. See ongi põhiline dioodidele esitatav nõue.

Praktikas kasutatakse dioodide iseloomustamiseks teisi suurusi, mida nimetatakse dioodi parameetriteks.

Dioodil peab olema suur vastutakistus, teiste sõnadega, kui dioodile rakendada vastupinge, siis vool, mida sel juhul nimetatakse dioodi vastuvooluks I_0, peab olema väike. Diood on seda parem, mida suurema vastupinge võib talle rakendada ja mida väiksem on seejuures vastuvool läbi dioodi *p-n*-siirde.

Dioodi päritakistus peab olema väike, s. o. päripinge rakendamisel dioodile peab vool läbi *p-n*-siirde olema suur ja seda voolu nimetatakse pärivooluks I_p. Diood on seda parem, mida väiksem on päripingelang *p-n*-siirdel ja mida suuremat voolu *p-n*-siire läbi laseb.

Seega iseloomustatakse alaldusdioodi nelja järgmise elektrilise parameetriga U_v, I_0, U_p ja I_p.

K õ r g s a g e d u s d i o o d. Kõrgsagedusdioodid valmistatakse germaaniumist ja ränist punktdioodidena. Punktdioodidele lubatav pärivool on tunduvalt väiksem pinddioodidele lubatavast pärivoolust. Vastupinge on samuti väiksem. Kuna *p-n*-siirde mahtuvus on väiksem (punktsiirde pind on väiksem), siis nende maksimaalne töösagedus on kõrgem.

Kõrgsagedusdioode kasutatakse detektorites, sagedusmuundurites, mõõtelülitustes ja ka väikesevõimsuselistes alaldites.

Ü l i k õ r g s a g e d u s d i o o d i d on samuti punktdioodid, kusjuures nende *p-n*-siirdepind on samuti väike. Need dioodid on

keraamilistes padrunites ja väljaviikude induktiivsuse vähendamiseks puuduvad neil väljaviikjuhtmed. Ülikõrgsageduslikke dioode kasutatakse detsimeeter- ja sentimeeterlainete piirkonnas vastuvõtjate muundusastmeis ning detektorites, samuti ülikõrgsageduslikus mõõteaparatuuris.

Nende dioodide tööd iseloomustatakse mõningate eriparameetrite abil, milleks on:

1) voolutundlikkus, s. t. alaldatud voolu ja detektorile antud võimsuse suhe

$$E = \frac{I}{P_{sis}},$$

mis iseloomustab dioodi töö efektiivsust nõrga sisendsignaali puhul ($E \approx 4$ A/W);

2) muunduskaotegur detsibellides (dB)

$$b = 10 \lg \frac{P_{sis}}{P_{välj}},$$

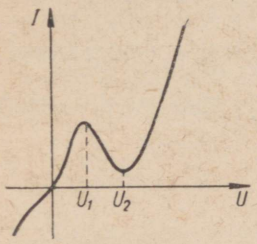
kus P_{sis} on muundurile antav võimsus,

$P_{välj}$ — koormusele antav vahesageduslik võimsus.

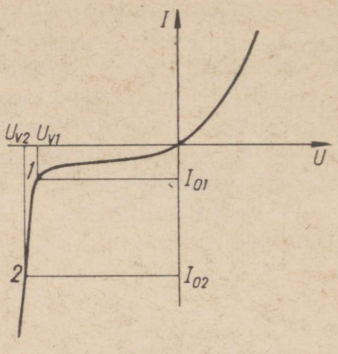
Ülikõrgsagedusdioodide lubatav pärivool ulatub kuni 30 mA-ni, lubatav vastupinge on kuni 15 V. Laengukandjate ebaühtlane liikumine läbi *p-n*-siirde kutsub esile voolu muutusi, mis tekitavad väljundsignaalis mürasid. Neid mürasid nimetatakse dioodi omamüraks ja iseloomustatakse omamürateguriga.

Omamürategur näitab, mitu korda on dioodi omamürad suuremad kui dioodi takistusega võrdse takisti klemmidel esinevad soojuslikud mürad. Üldiselt on omamürad ränidioodidel 2...3 korda väiksemad kui germaaniumdioodidel.

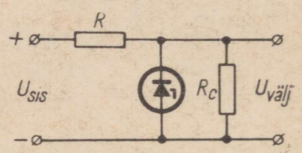
Eriotstarbelised dioodid. Eriotstarbelistes dioodides kasutatakse mõningaid *p-n*-siirde eriomadusi. Eriotstarbelistest dioodidest on levinumad tunneldioodid ja ränistabilitronid. Tunneldioodi läbiva voolu sõltuvus dioodile rakendatud pingest (nn. pinge-voolu tunnusjoon) on mõnevõrra ebatavalise kujuga (joon. 29). Olulisemateks erinevusteks tavalise dioodi tunnusjoonest on suur vastuvool ja tunnusjoone pärisuuna osal esinev negatiivse diferentsiaalse takistusega osa. Tunneldioodi *p-n*-siirdes on lisandite kontsentratsioon kõrge ning ruumilaeng koondub väga kitsale alale. Selle tulemusena tekib *p-n*-siirdes väga tugev elektriväli. Kui tunneldioodile rakendada vastupinge, siis elektrivälja tugevus suureneb veelgi, vastuvool suureneb intensiivselt ja võib isegi ületada pärivoolu väärtuse. Vool suureneb tugeva elektrivälja mõjul aatomitelt ärakistud elektronide arvel. Seda nähtust nimetataksegi tunnelefektiks. Tunnelefekt esineb ka väikese päripinge puhul. Alates pingest U_1, mille suurus on mõni kümnendik volti, hakkab tunnelefekt nõrgenema ja tekib tunnusjoone langev osa. Pingel U_2 (0,3...0,6 V) tunnelefekt kaob ja tunnusjoon muutub



Joon. 29. Tunneldioodi pinge-voolu tunnusjoon



Joon. 30. Stabilitroni pinge-voolu tunnusjoon



Joon. 31. Stabilitroni lülitusskeem

sarnaseks tavalise dioodi avasuuna tunnusjoonega. Tunnusjoone langeva osa tõttu leiab tunneldiood kasutamist peamiselt just spetsiaalsetes ostsillaatorites ja võimendites.

Ränistabilitronid kujutavad endast ränipinddioode, mida kasutatakse alalispinge stabiliseerimiseks.

Stabilitroni omapära seisneb selles, et ta töötab dioodi pinge-voolu tunnusjoone (joon. 30) nn. läbilöögiosas, kus alates vastupinge teatud väärtusest U_{v1}, mida sel juhul nimetatakse stabiliseeritavaks pingeks, pinge *p-n*-siirdel muutub vastuvoolu I_{01} suurte muutuste puhul tühiselt vähe. Seega on tunnusjoonel väga väikese vastutakistusega osa.

Joonisel 31 on näidatud stabilitroni tööpõhimõte.

Joonisel on stabilitron lülitatud vastassuunas ja järelikult on tema takistus väga suur. Stabiliseeritud pinge saadakse takistilt R_c. Stabilitroni pinge väike suurenemine kutsub esile stabilitroni takistuse vähenemise, mistõttu lisapinge langeb takistile R, kuna pinge takistil R_c jääb praktiliselt konstantseks.

Pooljuhtstabilitrone iseloomustatakse samade parameetritega millega alaldusdioode, kuid lisaks eespool toodud neljale parameetrile kasutatakse veel nn. dünaamilist takistust r_d:

$$r_d = \frac{U_{v2} - U_{v1}}{I_{02} - I_{01}} = \frac{\Delta U_v}{\Delta I_0},$$

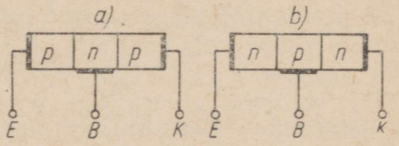
kus U_{v2} on pinge punktis *2*,
U_{v1} — pinge punktis *1*,

I_{01} — vastuvool, mis vastab pingele U_{v1},
I_{02} — vastuvool, mis vastab pingele U_{v2}.

Nagu valemist näha, iseloomustab dünaamiline takistus seda, kui palju muutub stabiliseeritav pinge sõltuvalt stabilitroni läbivast vastuvoolust.

2. 2. TRANSISTORID

Transistori ehitus. Kui asetada üksteise vastu kolm pooljuhikihti, millest äärmised on ühesuguse juhtivustüübiga, keskmine aga erineva juhtivustüübiga, siis saadakse pooljuhtseadis, mida nimetatakse transistoriks. Transistor kujutab endast seega pooljuhtseadist, milles on kaks *p-n*-siiret. Valmistatakse *p-n-p-* ja *n-p-n*-tüüpi transistore sõltuvalt sellest, kas kahe aukjuhtivusega kihi vahel on elektronjuhtivusega kiht või elektronjuhtivusega kihtide vahel on aukjuhtivusega kiht (joon. 32, *a* ja *b*). Transistori keskmist osa nimetatakse baasiks, üht äärmist emit-



Joon. 32. *p-n-p-* (*a*) ja *n-p-n* (*b*) tüüpi transistorid

teriks ja teist kollektoriks. Kui transistor töötab võimendina, siis pingestatakse emitter baasi suhtes pärisuunas ja kollektor vastusuunas.

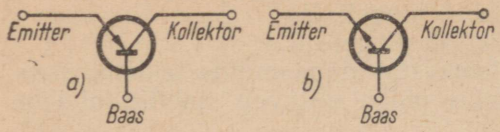
Joonisel 33 on toodud *p-n-p-* ja *n-p-n*-tüüpi transistori tingmärgid.

Kristall koos emitteri, baasi ja kollektori elektroodidega paigutatakse hermeetilisse korpusse. Transistori skeemi ühendamiseks on ta varustatud elektroodidega ühendatud väljaviikudega.

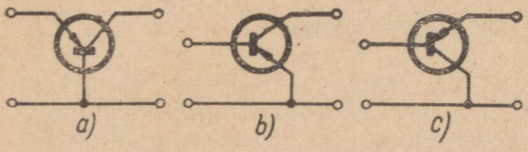
Emitteri ja baasi vahelist *p-n*-siiret nimetatakse emittersiirdeks, baasi ja kollektori vahelist siiret aga kollektorsiirdeks. Sõltuvalt *p-n*-siirde konstruktiivsest kujundusest (analoogiliselt dioodidega) on olemas punkt- ja pindtransistorid. Käesoleval ajal valmistatakse ainult pindtransistore. Transistori omadused sõltuvad suurel määral valmistamise tehnoloogiast.

Transistori tööpõhimõte. Kuna transistoril on kolm klemmi, siis töötades võimendina, millel on neli klemmi, peab üks elektrood olema väljundile ja sisendile ühine. Sõltuvalt sellest, milline elektrood on ühine, on olemas ühise baasi (joon. 34, *a*), emitteri (joon. 34, *b*) ja kollektoriga (joon. 34, *c*) lülitused. Kuna enamasti ühine elektrood maandatakse, siis nimetatakse neid lülitusi mõnikord ka maandatud baasi, emitteri ja kollektoriga lülitusteks.

Vaatleme transistori tööpõhimõtet ühise baasiga lülituses.



Joon. 33. *p-n-p-* (*a*) ja n-p-n- (*b*) tüüpi transistori tingmärgid



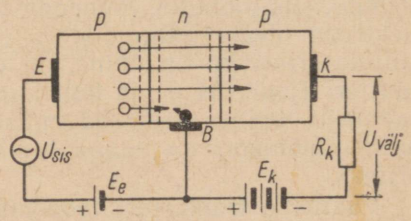
Joon. 34. Transistori lülitamise viisid:
a — ühise baasiga lülitus; *b* — ühise emitteriga lülitus; *c* — ühise kollektoriga lülitus

Joonisel 35 tähistatakse E_e-ga emitteri toiteallikat, E_k-ga kollektori toiteallikat, U_{sis}-ga väikese vahelduvpinge-(signaali-) allikat ja R_k-ga koormustakistit.

Transistori võib tinglikult vaadelda kahe järjestikku ühendatud pooljuhtdioodina, millel on üks ühine osa (baas). Seepärast on ka transistoris asetleidvad protsessid mõnevõrra sarnased dioodis toimuvatega. Nagu varem öeldud, rakendatakse transistor tööle selliselt, et emitteri *p-n*-siire pingestatakse pärisuunas ja kollektorsiire vastusuunas, see tähendab, et antud juhul tuleb emitter ühendada emitteri pingeallika positiivse klemmiga ja kollektor kollektori pingeallika negatiivse klemmiga, kusjuures pingeallikate ülejäänud klemmid ühendatakse baasiga.

Emitterile rakendatud päripinge loob emittersiirdel elektrivälja, mille mõjul potentsiaalibarjäär emitteri üleminekul alaneb ja augud tungivad emitterist kergesti baasi. Emittersiiret läbib tugev pärivool, mida mõjutab tunduvalt väiksemgi pingemuutus, sest siirde päritakistus on väike. Seega kui kollektoriahel on katkestatud, siis voolab emitter-baas-ahelas tugev vool. See vool on sarnane dioodi pärivooluga.

Nüüd vaatame, mis toimub kollektorsiirdes. Kollektor töötab vastupingerežiimis. Väline pinge loob kollektorsiirdel elektrivälja, mis suurendab tõkkekihi paksust ja seega ka siirdetakistust. Seetõttu läbib avatud emitteri korral kollektorsiiret väga väike vastuvool.



Joon. 35. Transistori töötamise põhimõtteline skeem

Olukord muutub, kui mõlemad siirded on üheaegselt pingestatud. Transistori valmistamisel on silmas peetud seda, et emitteris oleks laengukandjaid rohkem kui baasis. Sellega on garanteeritud, et rekombinatsiooni tõttu baasis ei likvideeru emitterist baasi difundeerunud laengukandjad täielikult. Kui kollektoriahel ei olnud pingestatud, siis liikusid kõik emitterist tulnud augud baasi elektroodile ja esines tugev baasivool. Kui aga üheaegselt on rakendatud pinge nii emitteri kui ka kollektori *p-n*-siirdele, muutub voolude jagunemine transistoris tunduvalt. Oluline on see, et baas oleks võimalikult õhuke. Elektriväli mõjub ainult vahetult *p-n*-siirdele, kuna muus osas elektriväli puudub. Seetõttu hakkavad emitterist baasi tulnud augud liikuma seal difusiooni toimel. Et baasi ala on väga kitsas, siis enamik auke, liikudes difusiooni toimel, ei jõua baasi elektroodini, vaid kollektorsiirdeni. Kollektorsiirdes aga mõjub elektriväli, mis suunab sinna saabunud augud kollektorisse. Seega siis jaguneb emitterivool baasi- ja kollektorivooluks. Seejuures on baasivool tunduvalt väiksem kollektorivoolust (tavaliselt moodustab 1 ... 2%):

$$I_e = I_k + I_b; \quad I_b \ll I_k; \quad I_e \approx I_k.$$

Kui rakendada emitteri ja baasi vahele järjestikku alalispingeallikaga E_e vahelduv sisendpinge U_{sis}, siis tekitavad väikesed sisendpinge muutused küllalt suuri emitterivoolu muutusi (avasuunarežiim). Peaaegu niisama suured voolumuutused tekivad ka kollektoriahelas, kuna enamik emitterist emiteeritud aukudest (95 ... 99%) jõuab kollektorsiirdesse. Tingituna kollektoriringi vastupingerežiimist võib sinna lülitada koormustakistuse, mis peaaegu ei mõjuta kollektoriringi tööd, sest kollektoriringi takistus on suur. Kollektoriringis oleval koormustakistil aga tekivad kollektorivoolu muutuste tulemusena pingemuutused ja järelikult võib saada takistil väljundpinge. Joonisel 36 on kujutatud eespool toodud protsessid graafiliselt.

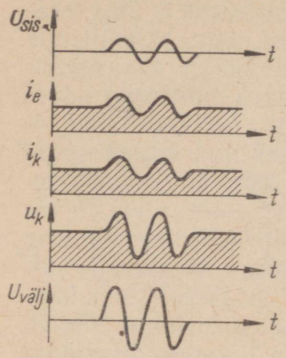
Koormustakistil tekkiv pingelang avaldub järgmiselt:

$$U_{välj} = I_k R_k \gg U_{sis} = \Delta I_e r_{sis}$$

ja pinge võimendustegur

$$K = \frac{U_{välj}}{U_{sis}} = \frac{R_k}{r_{sis}}.$$

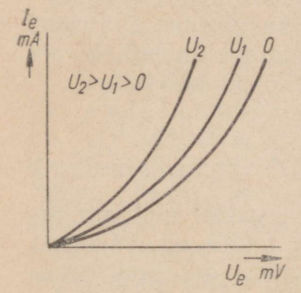
Kokkuvõtteks võib transistori tööpõhimõtte kohta öelda järgmist: väikese takistusega emitteriringis sisendpinge poolt tekitatud voolumuutused kanduvad peaaegu niisama suurtena üle suure takistusega kollektoriringi ja kollektoriringi lülitatud koormustakistilt saadakse võimendatud väljundpinge. Seega võib transistori vaadelda kui takistusmuundurit, millest on tuletatud ka ta

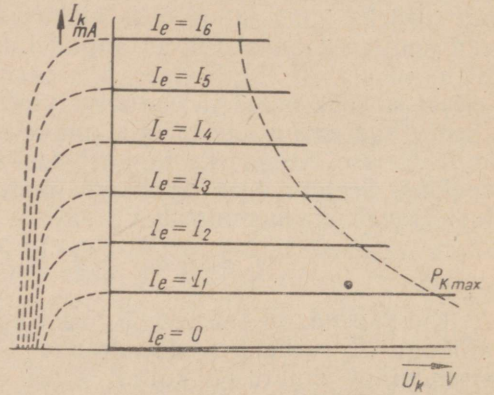


Joon. 36. Pinge ja voolu graafikud

Joon. 37. Transistori sisendtunnusjoon

Joon. 38. Transistori väljundtunnusjoon





nimetus (lühend ingliskeelsest nimetusest *transformer of recistance*).

n-p-n-tüüpi transistori tööpõhimõte on põhimõtteliselt sama mis *p-n-p*-tüüpi transistoril. Erinevuseks on aga see, et emitterist baasi liikuvateks laengukandjateks on *n-p-n*-tüüpi transistoril elektronid, mitte aga augud nagu *p-n-p*-tüüpi transistoril. Pingestamise reegel jääb samuti endiseks, kuid kuna vastavate piirkondade juhtivustüübid on vastupidised, siis peavad vooluallikate poolused *p-n-p*-tüüpi transistoridega võrreldes olema ka vastupidised.

Transistori staatilised tunnusjooned. Analoogiliselt elektronlampidega kasutatakse ka transistoride omaduste iseloomustamiseks staatiliste tunnusjoonte sarju. Erinevuseks on see, et iga lülituse jaoks (ühise baasi, emitteri ja kollektoriga) kasutatakse transistoride korral erinevaid tunnusjooni. Põhilisteks tunnusjoonteks on sisend- ja väljundtunnusjooned, millele elektronlambi puhul vastaksid võre- ning anoodtunnusjooned. Kuid peale sisend- ja väljundtunnusjoonte iseloomustatakse transistore veel voolu ülekande ning tagasisidestuse tunnusjoontega, kuigi neid kasutatakse harvemini.

Joonisel 37 on toodud ühise baasiga lülituse sisendtunnusjooned $I_e = f(U_e)$, kui $U_k = const$. On loogiline, et need tunnusjooned on väga sarnased dioodi pärisuuna tunnusjoonega. Kollektoripinge suurendamisega kaasneb voolu tõus. Seejuures on maksimaalne emitterivool määratud põhiliste laengukandjate kontsentratsiooniga emitteris. Nõrkade voolude piirkonnas on kirjeldatud tunnusjooned tunduvalt mittelineaarsed.

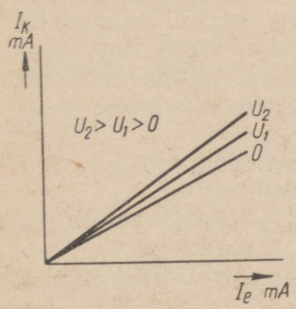
Joonisel 38 on toodud väljund- ehk kollektoritunnusjoonte sari ühise baasiga lülituses. Siin on tunnusjooneks kollektorivoolu sõltuvus kollektoripingest, kui emitterivool on konstantne:

$$I_k = f(U_k), \text{ kui } I_e = const.$$

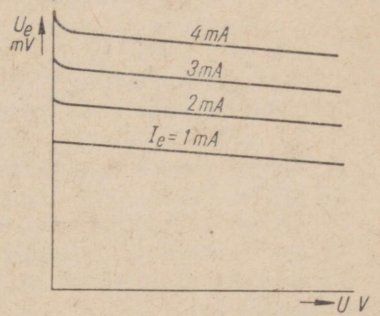
Kollektorivoolu suurus on määratud emitterist baasile liikuvate laengukandjate hulgaga. Kui $I_e = 0$, siis on kollektori tunnusjoon sisuliselt ja ka kujult sarnane dioodi vastusuuna tunnusjoonega. Kollektorivoolu põhjustajaks on baasi vähemus-laengukandjad ja seetõttu on arusaadav, et juhul kui $I_e = 0$, on kollektorivool väga nõrk. Niipea kui tekib emitterivool, s. t. emitterist tuleb baasi jaoks vähemus-laengukandjaid, suureneb kollektorivool kohe. Kui muuta kollektoripinge polaarsust, hakkavad laengukandjad liikuma kollektorist baasi. Nendele vastu liiguvad baasi emitterist tulnud laengukandjad. Sel juhul moodustab kollektorivoolu nende kahe voolu summa ja ta kujuneb taoliseks, nagu on näidatud tunnussarjal kriipsjoonega (koordinaatide alguspunktist vasakul olevas osas).

Voolu ülekande tunnusjooneks ühise baasiga lülituses on $I_k = f(I_e)$, kui $U_k = const$ (joonis 39). Nagu teame, on kollektorivool määratud kollektori vastuvoolu ja emitterist kollektorisse liikuvatest laengukandjatest põhjustatud voolu summaga:

$$I_k \approx \alpha I_e + I_{k0},$$



Joon. 39. Transistori voolu ülekande tunnusjoon



Joon. 40. Transistori tagasisidestuse tunnusjooned

kus I_{k0} on kollektori algvool olukorras, kus $I_e = 0$,

I_e — emitterivool,

α — voolu võimendustegur ühise baasiga lülituses $\alpha = 0{,}95 \ldots 0{,}99$.

Kuigi α väärtus mõnevõrra sõltub emitterivoolust, on voolu ülekande tunnusjooned praktiliselt siiski lineaarsed, kui transistor töötab lineaarses võimendusrežiimis, ja määratavad kollektor-tunnusjoontelt.

Tagasisidestuse tunnusjooned iseloomustavad kollektoripinge mõju emitteripingele muutumatu emitterivoolu korral (joon. 40).

$$U_e = f(U_k), \text{ kui } I_e = const.$$

Kuna toodud tunnusjooned on üsna lamedad, on väljundringi pingete mõju sisendringile küllaltki väike. Tagasisidestuse tunnusjooni saab konstrueerida, kui sisendtunnusjooned on antud.

Ühise emitteriga ja ühise kollektoriga lülituste jaoks on olemas kõik needsamad tunnusjooned mis ühise baasi puhul. Tunnusjoonte kujud on ainult mõnevõrra erinevad ja muidugi on teistsugused ka telgedel toodud suurused.

Transistori parameetrid. Peale staatiliste tunnusjoonte on transistoridel nende omaduste iseloomustamiseks parameetrid. Parameetrid iseloomustavad transistore teatud kindlas tüüprežiimis ja võimaldavad sageli arvutusi lihtsustada. Transistoride puhul on otstarbekas kasutada parameetreid nõrkade sisendsignaalide puhul. Tugevate sisendsignaalide korral on õigem valida režiim ja teha arvutused staatiliste tunnusjoonte abil.

Parameetrite määramiseks kasutatakse mitmesuguseid transistori aseskeeme. Kuna aseskeemides on erinevusi, siis kasutatakse ka mitmeid parameetrite süsteeme (Z-, Y- ja h-parameetreid). Senini kasutatakse kõige enam h-parameetrite süsteemi, mida nimetatakse ka hübriidparameetriteks. Z-parameetrite süsteemis kujutavad kõik parameetrid endast takistusi, Y-parameetrite süsteemis aga juhtivusi. h-parameetrite puhul sellist kindlat reeglit ei ole. h-parameetrite süsteemi suurimaks eeliseks on arvutuste tegemise ja parameetrite määramise lihtsus. Puudusena tuleb märkida seda, et neil puudub lihtne seos transistori geomeetriliste parameetritega. Olenevalt transistori lülitusviisist on h-parameetrite väärtused erinevad. h-parameetrite süsteemi moodustavad neli järgmist parameetrit:

1) h_{11} — sisendtakistus lühistatud väljundi puhul;
2) h_{12} — tagasisidestustegur avatud sisendi puhul;
3) h_{21} — vooluvõimendustegur lühistatud väljundi puhul;
4) h_{22} — väljundjuhtivus avatud sisendi puhul.

Toodud h-parameetrid iseloomustavad transistori tööd madalatel sagedustel.

Peale h-parameetrite kasutatakse transistori omaduste iseloomustamiseks madalatel sagedustel veel järgmisi parameetreid:

1) vooluvõimendustegur ühise emitteriga lülituse puhul:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \frac{\alpha}{1 - \alpha};$$

2) kollektorsiirde vastuvool I_{k0}, s. o. vastuvool kollektoriringis, kui emitteri vooluring on avatud;

3) emittersiirde vastuvool I_{e0}, s. o. vastuvool emitteriringis, kui kollektori vooluring on avatud.

Transistori kõrgsageduslikke omadusi iseloomustatakse järgmiste parameetritega:

1) $|\beta|$ — vooluvõimendustegur kõrgel sagedusel;

2) f_β või f_α piirsagedus töötamisel võimendina, s. o. sagedus, mille juures vooluvõimendus väheneb 0,7-ni võimendusest madalatel sagedustel;

3) C_k — kollektori p-n-siirde mahtuvus, mida mõõdetakse avatud emitteri puhul baasi ja kollektori elektroodide vahel. Mida väiksem on see mahtuvus, seda paremini töötab transistor kõrgetel sagedustel;

4) C_e — emitteri p-n-siirde mahtuvus, mida mõõdetakse lahtise kollektoriga emitteri ja baasi elektroodide vahel;

5) f_{max} — maksimaalne genereerimissagedus, s. o. suurim sagedus, mida transistor võib anda elektrivõnkumiste generaatorina töötades;

6) $r'_b C_k$ — transistori ajakonstant.

Transistori töö iseloomustamiseks impulss-skeemides kasutatakse järgmisi parameetreid:

1) U_{ks} — kollektori küllastuspinge;

2) U_{bs} — baasi küllastuspinge;

3) τ_e — ekstraktsiooniaeg;

4) B_{st} — staatiline (alalisvoolu) vooluvõimendustegur.

Parameetrite viimase rühmana võib veel märkida maksimaalseid ekspluatatsioonis lubatud piirväärtusi pingete, voolude ja võimsuse jaoks.

Kõik transistori parameetrid sõltuvad temperatuurist ning transistoridel töötavate skeemide arvutamisel tuleb seda arvestada.

T r a n s i s t o r i d e l i i g i d. Transistore liigitatakse tavaliselt järgmiste tunnuste järgi.

Kollektori lubatava kaovõimsuse järgi:

1) väikese võimsusega, mille kollektori kaovõimsus $P_{k\,max}$ ei ületa 300 mW;

2) keskmise võimsusega, millel $P_{k\,max} \leqslant 1{,}5$ W;

3) suure võimsusega, millel $P_{k\,max} > 1{,}5$ W.

Maksimaalse töösageduse järgi:

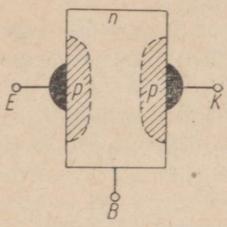
1) madalsageduslikud $f_\alpha \leqslant 3$ MHz;

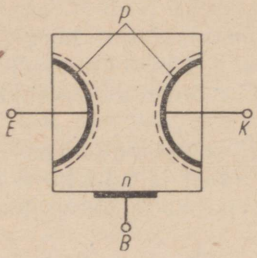
2) kesksageduslikud $f_\alpha \leqslant 30$ MHz;

3) kõrgsageduslikud $f_\alpha \leqslant 300$ MHz;
4) ülikõrgsageduslikud $f_\alpha > 300$ MHz.

Sõltuvalt valmistamise tehnoloogiast ja konstruktsioonist valmistatakse sulandtransistore, pind-barjäärtransistore, difusioontransistore, triivtransistore, kanaltransistore jt.

Sulandtransistorid on kõige rohkem levinud. Nende valmistamise tehnoloogia on samasugune kui pinddioodidel. Kahe siirde saamiseks sulatatakse lähtekristalli mõlemale küljele lisandid, mille tulemusena tekivad põhimaterjalist erineva juhtivustüübiga tsoonid (joon. 41).





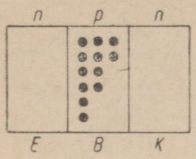
Joon. 41. Sulandtransistori ehitus

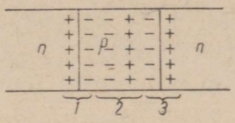
Joon. 42. Pind-barjäärtransistori ehitus

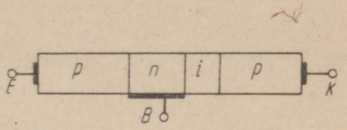
Sellel meetodil valmistatakse nii keskmise kui ka suure võimsusega transistore. Baasi laiuseks saadakse 10 ... 20 μm.

Pind-barjäärtransistori valmistamisel püütakse saada võimalikult õhuke baas. *n*-juhtivusega germaaniumist lähtekristalli tekitatakse elektrolüütilise söövitamise teel etteantud sügavusega süvendid (joon. 42). Pärast söövitamist kantakse elektrolüütilisel teel süvendi pinnale õhuke indiumikiht ja kuumutatakse seda, mistõttu indiumikihi all tekivad õhukesed *p*-juhtivusega tsoonid, nn. barjäärid. Kuna siirded on väikese pinnaga ja õhukesed, siis saab neid transistore kasutada ainult väikeste voolude ning pingete juures. Seepärast on seda tüüpi transistorid väikese võimsusega ja $f_\alpha \leqslant 100$ MHz. Baasi laius on 5 ... 25 μm.

Difusioontransistor on levinum ja perspektiivsem kõrg- ja ülikõrgsageduslik transistoritüüp. Oluliseks erinevuseks teistest transistoridest on see, et valmistamise tehnoloogia tõttu (lisandite difusioon) ei ole lisandite kontsentratsioon baasi ulatuses ühtlane. Seepärast ei ole ka laengukandjate kontsentratsioon baasi ulatuses ühesugune. Emitteri lähedal on laengukandjaid rohkem kui kollektori lähedal (joon. 43). Sellises olukorras püüavad augud liikuda kollektori suunas, et vähendada kontsentratsioonide erinevust. Kirjeldatud liikumise tagajärjel tekib baasis ruumilaeng. Baasi emitteripoolne külg laetakse negatiivselt ja kollektoripoolne positiivselt (joon. 44) analoogiliselt *p-n*-siirde tekkimisega. Kui aga tekib ruumilaeng, kujuneb baasis ka elektriväli, mis on suunatud kollektorilt emitterile. Baasis tekkiv elektriväli avaldab

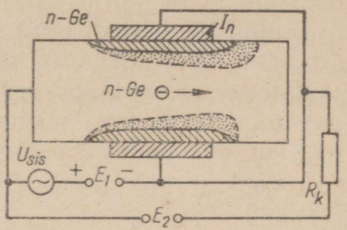






Joon. 43. Difusioontransistori laengukandjate jaotus baasis

Joon. 44. Laengu jagunemine baasis:
1 — emittersiire; *2* — baasi elektrivälja tsoon; *3* — kollektorsiire



Joon. 45. Triivtransistori ehitus

Joon. 46. Kanaltransistori ehitus

kiirendavat mõju emitterist kollektorisse siirduvatele elektronidele, mis nüüd ei liigu enam ainult difusiooni mõjul. Selle tagajärjel on laengukandjate liikumine baasis tunduvalt kiirem kui sulandtransistoridel. Kuna ka difusioontransistori baas on tavalisest õhem (kuni 1,5 μm), siis on difusioontransistor võimeline töötama väga kõrgetel sagedustel. Difusioontransistorid on väikese võimsusega, kusjuures $f_\alpha \leqslant 500$ MHz.

Triivtransistori (joon. 45) baasi ja kollektori vahele on moodustatud neutraalne tsoon (*i*-tsoon), mistõttu baasi ning kollektori elektroodid on nagu lükatud teineteisest eemale. Kui kondensaatori elektroodide vahekaugus suureneb, siis väheneb kondensaatori mahtuvus. Neutraalses *i*-tsoonis laengukandjad triivivad, millest tulenebki liigi nimetus.

Kanaltransistor kujutab endast *n*-juhtivusega pooljuhtkristalli, mille külgedele sulandatakse aktseptorlisandit, mis tekitab *n*-juhtivasse lähtematerjali *p*-juhtivusega piirkonnad (joon. 46). Sisend- ja väljundelektroodide vahel kulgeb vool elektromotoorjõu E_2 toimel. *p*-juhtivusega plaatidele antakse negatiivne potentsiaal (E_1), mis tekitab *n*-juhtivusega kristallis positiivse ruumilaengu. Ruumilaengu tsoonid aga voolu ei juhi, kuid nende laius hakkab sõltuma sisendpinge väärtusest, sest sisendpinge liitub pingega E_1. Sõltuvalt sisendpingest muutub laengute tsoon kord laiemaks, kord kitsamaks, millega kaasneb *n*-juhtivusega kristalli juhtivuse muutumine. Seega hakkab kristalli läbiv vool sõltuma sisendpinge väärtusest ja muutuma koos sisendpingega. Kuna laengukandjad liiguvad siin tugeva elektrivälja toimel, siis on nende liikumisaeg lühike, mistõttu kanaltransistore saab kasutada kõrgetel sagedustel. Võrreldes tavaliste transistoridega on nende sisend- ja väljundtakistused suured.

2. 3. TÜRISTORID

Juhitavad dioodid — türistorid — koosnevad kolmest järjestikku ühendatud *p-n*-siirdest (joon. 47).

Kui rakendada türistorile pinge joonisel näidatud suunas, siis *p-n*-siirded U_1 ja U_3 osutuvad päripingestatuks, aga siire U_2 vastupingestatuks. Seega võib türistori *p-n-p-n*-struktuuri ette kujutada kahe transistori (emittersiirdega U_1 ja kollektorsiirdega U_2 *p-n-p*-tüüpi transistori ning emittersiirdega U_3 ja kollektorsiirdega U_2 *n-p-n*-tüüpi transistori) omavahelise ühendusena (joon. 48).

Olgu α_1 *p-n-p*-tüüpi transistori vooluvõimendustegur ja α_2 *n-p-n*-tüüpi transistori vooluvõimendustegur; siis vool läbib siirde U_2 ja koosneb kolmest osast:

1) voolust $\alpha_1 i_1$ (siire U_2 on *p-n-p*-tüüpi transistori kollektoriks);

2) voolust $\alpha_2 i_3$ (siire U_2 on ka *n-p-n*-tüüpi transistori kollektoriks);

3) voolust I_{k0}, mis on siirde U_2 vastuvool.

Seega on kogu vool läbi siirde U_2 kolme komponendi summa:

$$i_2 = i_1\alpha_1 + i_3\alpha_2 + I_{k0},$$

kuna
$$i_1 = i_2 = i_3 = i,$$

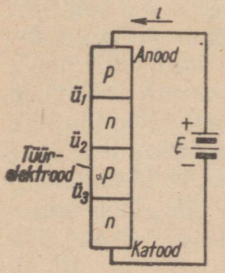
siis
$$i = i(\alpha_1 + \alpha_2) + I_{k0},$$

$$i = \frac{I_{k0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}.$$

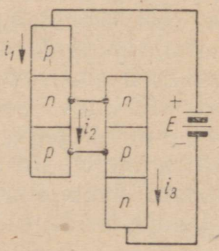
Tingimus $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ vastab seadise pinge-voolu tunnusjoone käänupunktile, millest alates tekib negatiivne takistus.

Türistori tööprintsiibi aluseks on *p-n-p-n*-struktuuri moodustavate koostistransistoride vooluvõimendustegurite sõltuvus neid läbivast voolust. Selline sõltuvus eksisteerib ränitransistorides.

Joonisel 49 on kujutatud *p-n-p-n*-struktuuri pinge-voolu tunnusjoon.



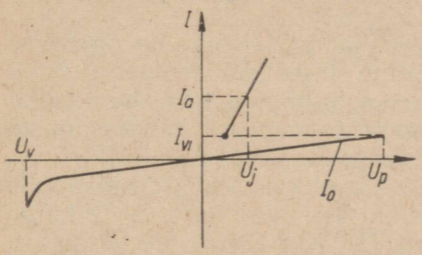
Joon. 47. Türistori ehitus



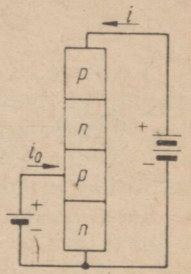
Joon. 48. Türistor kahe transistori ühendusena

Kui joonisel 47 kujutatud *p-n*-siirdele rakendada joonisel 49 kujutatule vastupidise polaarsusega pinge, siis keskmine siire U_2 on päripingestatud ning siirded U_1 ja U_3 vastupingestatud. Sellepärast määratakse *p-n-p-n*-struktuuri pinge-voolu tunnusjoone negatiivne osa (U_v) kas siirde U_1 või siirde U_2 pinge-voolu tunnusjoonega.

p-n-p-n-struktuurile päripinge rakendamisel (nagu eespool juba näidati) pingestatakse äärmised *p-n*-siirded pärisuunas ja keskmine *p-n*-siire vastusuunas. Läbi *p-n-p-n*-struktuuri voolab väike küllastusvool (I_0); selle voolu suurus määratakse keskmise *p-n*-siirdega. Struktuuri takistus on küllalt suur (megaoomides).



Joon. 49. Türistori pinge-voolu tunnusjoon



Joon. 50. Türistori lülitusskeem

Pinge suurendamisel kasvab vool läbi keskmise siirde ja järelikult ka läbi kogu struktuuri kuni $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Kui $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, on pinge siirdel võrdne pingega U_p (lülituspinge) ja tekib läbilöök. Pinge-voolu tunnusjoonel tekib negatiivse takistusega osa, sest vool läbi *p-n-p-n*-struktuuri kasvab ja järelikult kasvab ka struktuuri moodustavate transistoride vooluvõimendustegur, pinge struktuuril aga väheneb.

Kui *p-n-p-n*-struktuuri läbib vool $I = I_{VI}$, siis $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$. Läbi keskmise *p-n*-siirde voolab suurem vool kui *p-n-p-n*-struktuuri läbiv koguvool. Niisugune olukord võib esineda ainult sel juhul, kui keskmine *p-n*-siire pingestatakse pärisuunas ja ta emiteerib elektrone ning auke struktuuri moodustavate transistoride baasikihtidesse.

Seega osutuvad kõik kolm siiret pingestatuks pärisuunas. Kogu *p-n-p-n*-struktuurile rakendatud pingelang U_j on sel juhul võrdne pärisuunas pingestatud dioodidele langevate pingelangude ja mittealaldavatele kontaktidele langevate pingelangude summaga.

Seadise ümberlülitamine suletud olekust avatud olekusse ei toimu ainult lülituspingest suurema pinge rakendamise teel seadisele, vaid seda võib teha ka voolu andmise teel ühele keskmistest piirkondadest väljatoodud juhtmele (joon. 50), mida nimetatakse tüürelektroodiks.

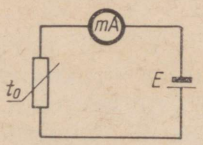
Kui tüürelektroodile rakendada niisuguse polaarsusega pinge, et ekvivalentse *n-p-n*-tüüpi transistori emitteri *p-n*-siire on päripingestatud, siis voolab tüürelektroodi ahelas tüürvool i_b. See vool liitub üldise seadist läbiva vooluga ja järelikult suurendab vooluvõimendustegurit, mis omakorda viib lülituspinge vähenemisele.

Seda voolu i_b suurust, mis kutsub esile lülituspinge vähenemise kuni väärtuseni, mis vastaks dioodi pinge-voolu tunnusjoone päripingestatud väärtusele antud voolu juures, nimetatakse tüürelektroodi lülitusvooluks I_{VI}.

2.4. TEISI POOLJUHTSEADISEID

Termotakistid. Teoreetiliselt ja katseliselt on kindlaks tehtud, et pooljuhtide takistus sõltub tugevasti temperatuurist. See võimaldab konstrueerida tundlikke termotakisteid ehk termistore. Käesoleval ajal kasutatakse selleks peamiselt mitmesuguste metallide (magneesium, titaan, kroom, vask, tsink jt.) oksiide.

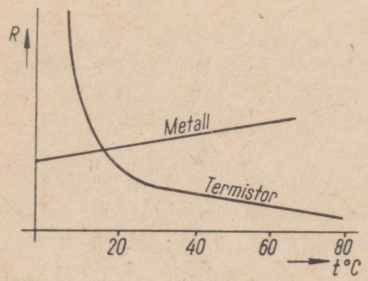
Termotakisti konstruktsioon on järgmine. Pooljuhitükikesele antakse kas niidi, pulga, plaadikese või kuulikese kuju. Selle külge kinnitatakse kaks metalljuhet (kontakti). Kui ühendame termistori kontaktid patarei ja tundliku mõõteriistaga (joon. 51), näeme, et voolu tugevus läbi termistori sõltub väga tugevasti keskkonna temperatuurist. Temperatuuri tõusuga kasvab laengukandjate, s. o. vabade elektronide ja aukude arv pooljuhis kiiresti, mistõttu pooljuhi takistus võib muutuda kümneid ja sadu kordi. Toatemperatuuril muutub termistori takistus 3...5% 1° C kohta. Takistuse sõltuvus temperatuurist on mittelineaarne (joon. 52). Termistori läbiva voolu soojusliku toime tõttu on termistori pinge-voolu

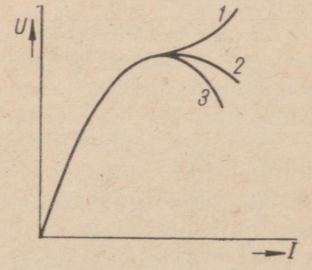


Joon. 51. Termistori lülitusskeem

Joon. 52. Termistori takistuse temperatuurisõltuvus

Joon. 53. Termistori pinge-voolu tunnusjoon



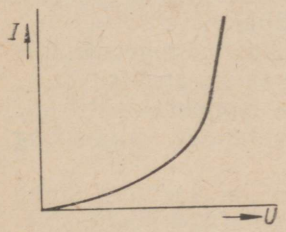


tunnusjoontel eriline kuju. Saadava pinge-voolu tunnusjoone kuju sõltub termistori ehitusest ja jahutustingimustest. Joonisel 53 on toodud mitmesugused võimalikud tunnusjooned. Sõltuvalt kasutusalast on termistore väga mitmesuguse ehitusega.

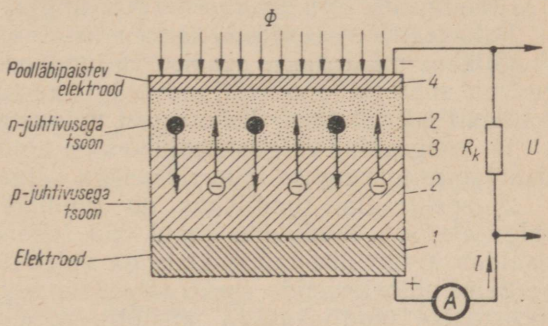
Termistore kasutatakse temperatuuri mõõtmiseks, kontaktitute lülititena, ülikõrgsageduslike võimsuste mõõtmiseks jne.

V a r i s t o r i d. Varistorid on mittelineaarsed pooljuhttakistid, mille takistuse väärtus sõltub rakendatud pingest. Pinge suurenemisel takistus väheneb. Joonisel 54 on toodud varistori pinge-voolu tunnusjoon.

Voolu ja pinge vahelist seost saab väljendada ka analüütiliselt: $I = kU^{\beta}$, kus k on varistori konstruktsioonist sõltuv tegur ja β — mittelineaarsuse tegur, mille suurus on 1,5 . . . 7.



Joon. 54. Varistori pinge-voolu tunnusjoon



Joon. 55. Seleenfotoelement

Valmistatavad varistorid liigitatakse kõrge- ja madalpingelisteks. Kõrgepingelistele varistoridele rakendatavad pinged ulatuvad mitmekümne kilovoldini ja nad leiavad kasutamist kõrgepingeliinide liigpingekaitsmetena.

Madalpingelised varistorid on ette nähtud pingele kuni 50 V, kusjuures üksikud tüübid erinevad β väärtuse poolest. Madalpingelisi varistore kasutatakse väga mitmesugustes side- ja automaatikaseadmeis. Kõikides varistori rakendustes kasutatakse tema mittelineaarset pinge-voolu tunnusjoont.

F o t o e l e m e n t. Fotoelektrilise eksponomeetri põhilisteks osadeks on seleenist tõkkekiht-fotoelement ja väike tundlik galvanomeeter. Fotoelemendi pinna valgustamisel tekib fotoelemendis nõrk elektrivool, mida registreerib galvanomeeter. Mida tugevam on pealelangev valgus, seda suurem on galvanomeetri hälve. Fotoelemendi abil on võimalik otseselt muundada valgusenergiat elektrienergiaks.

Käesoleval ajal valmistatakse fotoelemente mitmetest materja-

lidest (seleen, vaskoksiid, hõbesulfiid, germaanium, räni jt.). Sõltumata materjalist on nende tööpõhimõte kõigil ühesugune. Joonisel 55 on selgitatud seleenfotoelemendi tööd.

Metallist alusele *1* kantakse seleenikiht *2* ja selle peale veel õhuke poolläbipaistev kullakiht *4*. Termilise töötlemise käigus tekib seleenikihis *p-n*-siire *3* — tõkkekiht. Valgusenergia mõjul tekivad siirdetsoonis laengukandjad (elektronid ja augud). *p-n*-siirdes esineva elektrivälja toimel liiguvad elektronid ülemisele elektroodile ja augud alumisele. Laengukandjate ümberpaiknemise tõttu tekibki elektroodide vahel potentsiaalide vahe ja elektromotoorjõud.

Räni fotoelementide valmistamisel kasutatakse *n*-juhtivusega räni, mille pinnale tekitatakse difusiooni teel *p*-juhtivusega boorilisanditest tsoon. *p*-juhtivusega tsooni laius on ainult 1 ... 2 μm, mistõttu valgusenergia tungib vabalt *p-n*-siirdesse.

Fotoelektrilisi seadiseid iseloomustatakse valgustundlikkusega. Tundlikkus määratakse seadise väljundvoolu ja talle langeva valgusvoo suhtega, s. o. väljundvoolu väärtus 1-luumenise valgusvoo kohta. Eristatakse kahesugust valgustundlikkust:

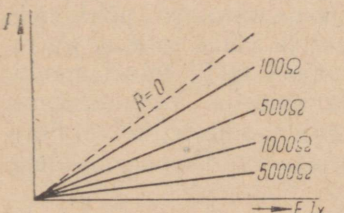
1) integraalne valgustundlikkus on tundlikkus valgusvoole, mis sisaldab mitmesuguse lainepikkusega valgust (kogu spektrit);

2) spektraalne tundlikkus on tundlikkus monokromaatilisele valgusele, s. t. tundlikkus juhul, kui seadisele langev valgusvoog sisaldab ainult ühe lainepikkusega valgust.

Seleenfotoelemendi spektraalne tundlikkus on sarnane silma spektraalse tundlikkusega, mistõttu teda kasutatakse valgustustehnilistel mõõtmistel. Temaga koos kasutatav galvanomeeter peab olema väikese sisetakistusega (30 ... 100 Ω), kuna suure takistuse korral sõltuvus voolu ja valgustustugevuse vahel muutub mittelineaarseks. Joonisel 56 on toodud seleenfotoelemendi voolu ja valgustustugevuse vaheline sõltuvus.

Seleenfotoelemendi tundlikkus on 400 ... 500 μA/lm ning puuduseks suur inerts.

Energeetiliseks otstarbeks valmistatud nn. päikesepatareides kasutatakse räni fotoelemente, millest järjestik- ja paralleelühenduste abil kujundatakse patareid. Taolised patareid annavad võimsust 60 ... 100 mW/cm². Kasutegur ulatub kuni 10%-ni. Maksimaalne tundlikkus on räni fotoelementidel infrapunase valguse piirkonnas.

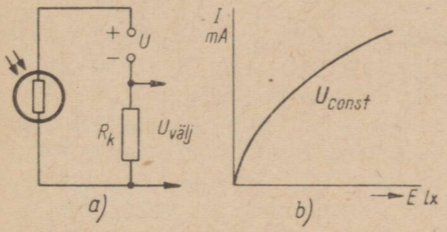


Joon. 56. Seleenfotoelemendi tunnusjoon

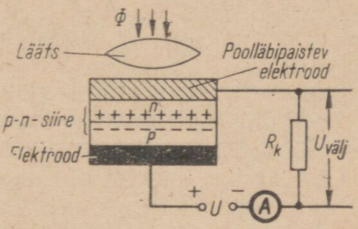
Fototakistid. Nagu katsed näitavad, suureneb mõningate pool-

juhtide elektrijuhtivus tugevasti mitte ainult temperatuuri tõusuga, vaid ka nende valgustamisel. Pooljuhis neeldunud valguskvantide energia arvel tekib palju vabu elektrone, mis põhjustavadki pooljuhi elektrijuhtivuse suurenemist. Seda nähtust nimetatakse seesmiseks fotoefektiks ja see leiab rakendust fototakistites.

Fototakisti kujutab endast tavaliselt pooljuhist plaadikest, mis on kinnitatud isoleermaterjalist alusele. Plaadikese vastaskülgedele on kinnitatud metallelektroodid fototakisti lülitamiseks vooluahelasse. Seejärel kaetakse ta läbipaistva lakiga ja paigutatakse plastmassist kesta, millel on ava valgustamiseks.



Joon. 57. Fototakisti lülitusskeem ja tunnusjoon



Joon. 58. Fotodioodi ehitus

Kui fototakisti ühendada vooluallikaga ja sulgeda vooluahel, siis voolab läbi fototakisti teatava tugevusega vool. Fototakisti valgustamisel tugevneb vool ahelas märgatavalt (kümneid kordi) — seda rohkem, mida tugevam on pealelangev valgus. Praktilistes rakendustes lülitatakse fototakisti joonisel 57, *a* toodud skeemi järgi.

Joonisel 57, *b* on toodud ka tema voolu tunnusjoon sõltuvalt valgustustugevusest. Fototakisti tundlikkus ei ole konstantne, vaid sõltub valgustustugevusest, mis avaldub joonisel 57, *b* toodud tunnusjoone mittelineaarsuses. Peale mainitud puuduse piirab tema kasutamist küllaltki suur inerts ja termiline ebastabiilsus. Fototakistite põhiliseks kasutusalaks on mitmesugused automaatikaseadmed.

F o t o d i o o d i d. Läbipaistvas korpuses pooljuhtdioodide juures võib märgata, et dioodi vastuvool suureneb, kui teda valgustada. Seda nähtust kasutatakse fotodioodides. Põhimõtteliselt on fotodioodid tavalised pooljuhtdioodid, mille *p-n*-siirde kohale on tehtud aken (joonis 58). Ta töötab vastupingerežiimis ja valgustustugevuse muutumisel muutub dioodi vastuvool. Koormustakistil saame valgustusega võrdelise väljundpinge. Pimeolukorras on dioodi vool väike (3 . . . 30 μA). Fotodioodidel on suur tundlikkus (3 . . . 30 mA/lm) ja väga väike inerts. Iga fotodioodi saab põhi-

mõtteliselt kasutada ka fotoelemendina, kuid otsekohe suureneb inerts ja väheneb tundlikkus. Fotodioodidega samal põhimõttel töötavad fototransistorid, mille kollektorivoolu tüüritakse emitteri *p-n*-siirde valgustamisega. Samal ajal on nad tüüritavad ka elektriliselt.

Fotodioode kasutatakse laialdaselt mitmesugustes automaatikaseadmeis, eriti seal, kus on vaja suurt reguleerimiskiirust.

3. PÕHIMATERJALID

3.1. GERMAANIUM

Germaaniumi põhilised omadused. Germaanium on üks põhilisi pooljuhtseadiste tootmiseks kasutatavaid pooljuhtmaterjale. Teda leidub maakeral tühistes kogustes, põhiliselt tsingimaakides (0,1 ... 0,5%), kivisöetolmus, tuhas ja merevees. Germaaniumimaaki nimetatakse germaniidiks, kuigi ta sisaldab palju rohkem vaske, tsinki ja rauda kui germaaniumi.

Väliselt sarnaneb germaanium metalliga. Germaaniumil väljenduvad metallilised ja mittemetallilised omadused võrdselt. Ta on väga tugev, kuid seejuures habras ning teda on väga raske töödelda. Puhta Ge eritakistus 298° K (25° C) juures on umbes 60 Ωcm ja sulamistemperatuur 1210° K (937° C). Tabelis 1 on toodud germaaniumi füüsikalised konstandid.

Õhu käes kattub kristalliline Ge õhukese oksiidikihiga 900° K (~ 600° C) juures aga oksüdeerub täielikult, moodustades GeO_2. Vesi ja happed germaaniumile mõju ei avalda. Ge lahustub lämmastikhappe ja fluorvesinikhappe segus, vesinikülihapendi vesilahuses ja kuumades NaOH ja KOH lahustes.

Pooljuhtide tööstuses kasutatav Ge peab olema väga puhas, lisandeid ei tohi olla üle 10^{-7}%.

Germaaniumi saamine ja puhastamine. Germaaniumi eraldamine maagist ja puhastamine lisanditest on üks põhilisi ning kallimaid protsesse pooljuhtide tööstuses. Maakide keemilise ümbertöötamise lõpp-produktiks on GeO_2. Selleks et saada GeO_2-st germaaniumi, kuumutatakse teda erilises puhtas grafiitlaevukeses 923° K (650° C) juures puhta vesiniku voolus, kus vesinik taandab GeO_2 germaaniumiks. Protsessi lõpuks tõstetakse temperatuur 1273° K (1000° C). Sellel temperatuuril Ge sulab ja jahtudes kristalliseerub polükristalliliselt, võttes laevukese kuju. Saadud Ge sisaldab palju lisandeid.

Monokristallilise germaaniumi saamiseks ja lisandite eraldamiseks töödeldakse polükristallilist germaaniumi spetsiaalsete metallurgiliste meetoditega.

Ge puhastamise meetodid põhinevad lisandite erineval lahustuvusel tahkes ja vedelas germaaniumis.

Lisandite hulga suhet tahkes faasis (C_T) ja vedelas faasis (C_v) nimetatakse jagunemisteguriks:

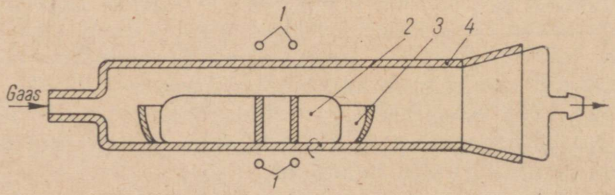
$$k = \frac{C_T}{C_v}.$$

Suurem osa lisandeid, välja arvatud boor, tõrjutakse jahtumisel tahkest faasist vedelasse faasi.

Praktikas kasutatakse põhiliselt kahte puhastusmeetodit: suunatud kristallisatsioon ja tsoonsulatus.

Suunatud kristallisatsioon. Grafiidist laevuke koos sulatatud germaaniumiga nihutatakse aeglaselt kuumast tsoonist välja. Sulami tahkumine algab liikumissuunapoolsest otsast ja nihkub vähehaaval teise otsani. Lisandid jagunemisteguriga $k < 1$ tõrjutakse Ge tahkunud osast vedelasse, lisanditel jagunemisteguriga $k = 1$ ümberpaiknemist ei toimu ja lisandid jagunemisteguriga $k > 1$ tõrjutakse tahkunud osasse. Kuna taandamise teel GeO_2 saadud germaaniumil on lisandid peamiselt jagunemisteguriga $k < 1$, siis peamine hulk lisandeid paikneb valandi lõpposas, (s. o. viimasena tahkunud osas).

Tsoonsulatus. Puhastatav Ge valand asetatakse grafiidist laevukesse. Laevuke paigutatakse kvartstorusse, millest juhitakse läbi puhast vesinikku. Kõrgsagedusinduktori abil sulatatakse kitsas riba valandist (joon. 59). Seejärel nihutatakse induktorit aeglaselt piki valandit, millega kaasneb ka sulatatud tsooni nihkumine piki valandit. Induktori mõjupiirkonnast väljunud valandiosas Ge jahtub ning kristalliseerub. Lisandid, mille $k < 1$, tõrjutakse tahkumisel sulasse tsooni. Seega tõrjutakse sulatatud tsooni nihutamisega lisandid valandi ühest otsast teise. Ühele valandile võib tsoonsulatust teha mitu korda järjest. Tootlikkuse suurendamiseks asetatakse piki kvartstoru kuni kuus induktorit järjestikku, nii et üksteise järel liiguvad mitu sulatatud tsooni. Tsoonpuhastuse teel saadakse väga puhas germaanium, mille eritakistus on kuni 60 Ωcm.



Joon. 59. Germaaniumi tsoonsulatusega puhastamise skeem:
1 — induktorid; *2* — Ge-valand; *3* — laevuke; *4* — kvartstoru

Monokristallide saamine. Pärast puhastamist on Ge polükristallilise struktuuriga, mis ei sobi pooljuhtide tootmiseks. Monokristallilise Ge saamiseks asetatakse polükristalliline Ge ülipuhtasse grafiidist või kvartsist tiiglisse ja sulatatakse seda spetsiaalses ahjus. Sulagermaaniumisse asetatakse kvartsvõlli külge kinnitatud germaaniummonokristalli tükike. Tiigel pannakse pöörlema, millega kindlustatakse ühtlane temperatuur kogu germaaniumi ulatuses. Edasi lülitatakse sisse kvartsvõlli pöörlemise ja tõstmise mehhanism. Vastavalt monokristalli tõstmisele ja koos sellega ka jahtumisele hakkab monokristalli pinnale kristalliseeruma germaanium. Moodustub pidevalt pikenev monokristalliline germaaniumvaland.

Kogu protsess viiakse läbi kas vaakuumis $1{,}33 \cdot 10^{-3} \ldots 1{,}33 \cdot 10^{-4}$ N/m^2 ($10^{-5} \ldots 10^{-6}$ mmHg) juures, puhta vesiniku või mõne inertse gaasi atmosfääris.

Vajaliku juhtivustüübi (p või n) ja eritakistusega germaaniumi saadakse legeerimise teel, s. o. sulatamise ajal germaaniumisse doonor- või aktseptorlisandite sisseviimise teel. Lisandite ühtlane jaotus saavutatakse pöörlemise ja kristalli kasvamise kiiruse sobiva reguleerimisega.

3. 2. RÄNI

Räni põhilised omadused. Räni on üks põhilisi pooljuhtmaterjale. Räni keelutsooni laius toatemperatuuril on 1,1 eV, seega märgatavalt laiem kui germaaniumil (0,7 eV). Seetõttu on räniseadistel germaaniumseadistega võrreldes rida eeliseid. Räniseadised võivad töötada temperatuuril kuni 470° K (~ 200° C). Räni p-n-siirete vastuvool on 1000 korda väiksem kui germaaniumil. Seetõttu on räni väga perspektiivne materjal. Räni sulamistemperatuur on 1696° K (1423° C).

Räni on leviku poolest hapniku järel teisel kohal looduses. Ta moodustab ligikaudu $^1/_4$ maakoore kaalust. Vabal kujul räni looduses ei esine. Suurel hulgal on teda maakoort moodustavate graniitide, gneisside ja basaltide koostises. Kvarts, põldpagu ja vilgukivi ning pinnast moodustavad liiv ja savi on samuti räni ühendid.

Räni kõige iseloomulikumaks ühendiks on ränidioksiid SiO_2. Vaba SiO_2 esineb mineraalina kvarts.

Puhast räni võib saada kahesugusel kujul: amorfsel ja kristallilisel. Amorfne räni on pruunika värvusega pulber. Kristalliline räni on tumehalli värvusega metallilise läikega habras materjal.

Tabelis 1 on toodud kristallilise räni füüsikalised konstandid.

Keemiliselt on kristalliline räni võrdlemisi inertne. Õhu käes kattub ta õhukese oksiidikihiga. Hapetes räni ei lahustu (välja arvatud HNO_3 ja HF segu). Ta lahustub hästi leelistes.

Kuumutamisel reageerib räni halogeenidega, moodustades räni-halogeniide (SiF_4, $SiCl_4$, $SiBr_4$, SiJ_4). Vesinikuga moodustab räni silaane (SiH_4, Si_2H_6 jne.).

Räni lahustub hästi paljudes sulametallides (Al, Sn, Pb, Au, Ag).

Pooljuhtide tööstuses kasutatavat monokristallilist räni iseloomustavad järgmised näitajad:

1) juhtivustüüp — elektron- või aukjuhtivus;

2) eritakistus on Ωcm;

3) legeeriv element — soovitud juhtivustüübi ja eritakistuse saamiseks ränisse viidud lisand;

4) laengukandjate difusioonipikkus L mm-des.

Räni margis КЭФ 4,5/0,5 on tähistel järgmine tähendus: К — räni; Э — juhtivustüüp; Ф — legeeriv element; 4,5 — eritakistus Ωcm; 0,5 — laengukandjate difusioonipikkus mm.

Räni saamine ja puhastamine. Kõrge puhastusastmega monokristallilise räni saamine on palju keerulisem germaaniumi puhastamisest. Seda kahel põhjusel:

1) sularäni suure keemilise aktiivsuse ja kõrge sulamistemperatuuri tõttu on raske vältida lisandite tungimist ränisse tiigli materjalist;

2) boorist puhastamine on aeganõudev, kuna boori jagunemistegur tahke ja sularäni vahel on ligikaudu võrdne ühega.

Räni tootmise lähtematerjalina kasutatakse ränidioksiidi. Ränidioksiid taandatakse elektriahjus koksiga räniks:

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO.$$

Nii saadakse tehnilise puhtusega räni. Edasiseks puhastamiseks muudetakse räni lenduvateks ühenditeks — halogeniididekс ($SiCl_4$) või silaanideks (SiH_4, Si_2H_6 jt.).

Ränihalogeniide puhastatakse destillatsiooniga või keemiliselt. Puhastatud $SiCl_4$ taandatakse uuesti räniks kas ülipuhta tsingiga või vesinikuga:

$$SiCl_4 + 2H_2 \rightarrow Si + 4HCl.$$

Selliselt saadud räni puhastatakse tsoonsulatamise meetodil. Kuna sularäni reageerib kvartsiga, kasutatakse tiiglita tsoonsulatust.

Nii on võimalik saada räni, mis sisaldab lisandeid 10^{-6} ... 10^{-8}%. Lõpuks kasvatatakse polükristallilisest materjalist monokristall. Monokristalli kasvatamise ajal lisatakse ränile soovitud juhtivustüübi ja eritakistusega materjali saamiseks legeerivaid elemente (boor või fosfor).

3.3. TEISED POOLJUHTMATERJALID

Füüsikute ja metallurgide ühise töö tulemusena on viimastel aastatel loodud terve rida uusi perspektiivseid pooljuhtmaterjale.

Mendelejevi tabeli III ja V rühma elementide liitmisel on saadud pooljuhtmaterjalid üldvalemiga $A_{III}B_{V}$. Sellistel pooljuhtmaterjalidel on laengukandjate liikuvus palju suurem kui germaaniumil ja ränil, mis teeb nad eriti sobivaiks kõrgsageduslike toodete valmistamiseks.

$A_{III}B_{V}$-tüüpi ühenditest on lihtsaim valmistada galliumarseniidi GaAs. Galliumarseniidi keelutsooni laius on 1,35 eV. Temast valmistatud pooljuhttoodete maksimaalne töötemperatuur on kuni 620° K (~ 350° C).

Tabel 1

Germaaniumi ja räni füüsikalisi andmeid

Iseloomustussuurused	Mõõtühik	Ge	Si
Aatomi mass	—	72,56	28,09
Tihedus 297° K juures	g/cm³	5,32	2,33
Sulamistäpp	°K(°C)	1210(937)	1696(1423)
Keelutsooni laius 300° K juures	eV	0,66	1,09
Elektrieritakistus 300° K juures	Ωcm	47	$2 \cdot 10^5$
Elektronide liikuvus 300° K juures	cm²/V · s	3800	1350
Aukude liikuvus 300° K juures	„	1800	500
Aatomite arv 1 cm³-s	1/cm³	$4{,}42 \cdot 10^{22}$	$4{,}96 \cdot 10^{22}$

Polükristallilist ränikarbiidi (SiC) kasutatakse mittelineaarse pinge-voolu tunnusjoonega pooljuhttakistite, varistoride, valmistamiseks. Monokristalliline ränikarbiid on uus pooljuhtmaterjal, mida hakatakse kasutama pooljuhtide tööstuses. Ränikarbiidi keelutsooni laius on 2,86 eV, mistõttu temast valmistatud pooljuhtseadised võivad töötada väga kõrgetel temperatuuridel.

Pooljuhtseadiste valmistamiseks kasutatav ränikarbiid peab olema väga puhas. Kuna ränikarbiidi sulamistemperatuur on ligi 2900° K (~ 2600° C), siis on tema puhastamine raske.

Kuna ränikarbiid on väga kõva materjal (teemandi järel teisel kohal), valmistatakse temast abrasiivpulbreid.

TRU Raamatukogu

3.4. AKTSEPTORLISANDID

Aktseptorlisanditeks Ge ja Si suhtes on Mendelejevi süsteemi III rühma elemendid. Nendest kasutatakse pooljuhtide tööstuses peamiselt alumiiniumi, indiumi, galliumi ja boori.

Alumiinium (Al) on hõbevalge kerge metall. Põhiline alumiiniumimaak on boksiit. Alumiiniumi tihedus 293° K (20° C) juures on 2,79 g/cm³ ja sulamistemperatuur 933° K (660° C). Sulaalumiinium on väga aktiivne ja reageerib kergelt kõigi metallidega. Temperatuuril üle 1300° K (~ 1000° C) moodustab Al sulameid isegi grafiidi ja kvartsiga. Temperatuuril üle 850° K (577° C) moodustab ta sulami räniga. Väga puhast alumiiniumi kasutatakse pooljuhtide tööstuses aktseptorlisandina *p-n*-siirete saamiseks *n*-tüüpi ränis.

Indium (In) on hõbevalge pehme metall. Looduses teda ehedalt ei leidu. Indiumi ühendeid saadakse värviliste metallide maakide ümbertöötamisel. In tihedus on 293° K (20° C) juures 7,0 g/cm³, sulamistemperatuur 428° K (155° C). Indium annab germaaniumiga kergesti sulameid. Räniga ta sulameid ei anna. Indium ja tema baasil valmistatud elektroodsulamid on põhilised materjalid *n*-tüüpi germaaniumil *p-n*-siirete saamiseks.

Gallium (Ga) on sinaka läikega hõbevalge pehme metall. Tal puudub maak. Teda leidub tsingi, alumiiniumi ja vase maakides. Ga tihedus on 5,9 g/cm³ ja sulamistemperatuur 303° K (30° C). Galliumi kasutatakse valandite legeerimiseks.

Booril (B) on kaks kuju: amorfne pruun pulber ja valge kristalliline boor. Boori looduslikud ühendid on boorhape ja tema soolad. Amorfse boori tihedus on 1,73 g/cm³, kristallilisel — 2,34 g/cm³, sulamistemperatuur 2300 . . . 2800° K (2000 . . . 2500° C). Tavalisel temperatuuril on boor väheaktiivne. Kõrgemal temperatuuril ühineb ta kergesti halogeenidega ja süsinikuga. Boori kasutatakse laialdaselt difusioonitehnikas *p-n*-siirete saamiseks.

3.5. DOONORLISANDID

Doonorlisanditeks on Ge ja Si suhtes Mendelejevi süsteemi V rühma elemendid. Nendest kasutatakse pooljuhtide tööstuses peamiselt antimoni, fosforit ja arseeni.

Antimonil (Sb) on mitu allotroopset teisendit: kollane, must ja kõige püsivam — tugeva läikega hallikasvalge metall. Antimon esineb looduses ühendina Sb_2S_3 (antimonläik). Sb tihedus on 6,60 g/cm³ ja sulamistemperatuur 903° K (630° C). Antimon on habras, tavalisel temperatuuril väheaktiivne. Ta annab paljude metallidega sulameid. Teda kasutatakse pooljuhtmaterjalide legeerimiseks, elektroodsulamite valmistamiseks ja difusioonitehnikas *p-n*-siirete saamiseks.

Fosforil (P) on mitu allotroopset teisendit, millest kõige rohkem tuntakse valget kristallilist fosforit ja punast pulbrilist fosforit. Looduses fosfor ehedalt ei esine. Teda leidub ühenditena paljudes mineraalides. Valge fosfori tihedus on 1,8 g/cm³, punasel — 2,3 g/cm³. Valge fosfori sulamistemperatuur on 317° K (44° C), punane fosfor aga aurustub sulamata. Valge fosfor on väga mürgine.

Pooljuhtide tööstuses kasutatakse põhiliselt fosforpentoksiidi P_2O_5 ja ortofosforhapet H_3PO_4. Fosforit kasutatakse valandite legeerimiseks ja *p-n*-siirete saamiseks difusiooni teel.

Arseen (As) on habras kristalliline terashall aine. Puhastatud As pinna metalne läige kaob õhu käes. Tihedus on 5,7 g/cm³. As sulamistemperatuur on 1093° K (820° C) $3{,}53 \cdot 10^6$ N/m² (36 at) juures. Kui arseeni kuumutada tavalisel rõhul, siis 883° K (610° C) juures arseen aurustub sulamata. Paljud arseeniühendid on mürgised. Pooljuhtide tööstuses kasutatakse teda analoogiliselt antimoniga.

3.6. ELEKTROOD- JA JOOTESULAMITE KOMPONENDID

Sulamiks nimetatakse ainet, mis on saadud kahe või enama elemendi kokkusulatamisel.

Enamik pooljuhtide tööstuses kasutatavaid elektroodsulameid sisaldab põhikomponentidena tina, seatina ja kulda. Pooljuhiga oomilise kontakti või *p-n*-siirde saamiseks lisatakse sulamile aktseptor- või doonorlisandeid.

Tina. Tina on hõbevalge pehme metall. Õhu käes tina tuhmub aeglaselt, kattudes õhukese oksiidikihiga. Oksiidikiht kaitseb teda edasise oksüdeerumise eest.

Ehedal kujul tina looduses ei esine. Teda saadakse mitmesugustest tinamaakidest, peamiselt kassiteriidist (tinakivi SnO_2).

Tina tihedus on 7,3 g/cm³ ja sulamistäpp 405° K (232° C). Tina on ühendeis nelja- ja kahevalentne. Toatemperatuuril on tina vastupidav keemilistele mõjutustele. Ta ei reageeri veega, lahjendatud hapetes lahustub ta aga väga aeglaselt. Kontsentreeritud hapetega reageerib tina energiliselt.

Seatina (pliid). Seatina on hall, sinaka varjundiga metall. Ta on tinast pehmem. Õhu käes kattub seatina kiiresti oksiidikihiga, mis kaitseb teda edasise oksüdeerumise eest.

Seatina esineb looduses ehedalt väga harva. Tähtsaim seatinamaak on galeniit (seatinaläik PbS).

Seatina tihedus on 11,3 g/cm³ ja sulamistäpp 600° K (327° C). Seatina kuulub perioodilisuse süsteemi IV rühma. Ühendeis on ta tavaliselt kahevalentne, harvemini neljavalentne.

Lahjendatud hapetes seatina ei lahustu, välja arvatud lahjendatud lämmastikhape. Kuumutamisel lahustub ta kiiresti kontsentreeritud hapetes ja tugevates leelistes.

Seatina ja tema ühendid on mürgised.

K u l d. Kuld on kollase värvusega metall. Ta kuulub väärismetallide hulka. Looduses leidub kulda ehedalt.

Kulla tihedus on 19,3 g/cm³ ja sulamistäpp 1336° K (1063° C). Kuld on keemiliselt väga vastupidav. Ta ei reageeri hapete ega leelistega. Kuld lahustub ainult HCl ja HNO_3 segus, nn. kuningvees.

3.7. LAKID JA VÄRVID

Pooljuhtide tööstuses kasutatakse lakke ja värve valmistoodete värvimiseks. Värvikilele esitatakse järgmised nõuded. Värv peab olema:

1) küllaldase mehaanilise tugevusega;
2) hea adhesiooniga (liituvusega) kaetava materjali suhtes;
3) vastupidav klimaatilistele mõjutustele (temperatuur, niiskus);
4) kaitsma pinda korrosiooni eest;
5) olema hea elektriisolaator.

Lakk koosneb lahustajast ja tahkest vaigust. Lahustaja aurumisel jääb värvitud pinnale vaigukile.

Värv koosneb kilet moodustavast ainest (sideaine) ja pigmendist. Värvi koostisse võivad kuuluda veel lahustajad, plastifikaatorid, täiteained jt. lisandid.

Kilet moodustava aine ülesandeks on pigmendi ja täiteaine osakesed kokku siduda pinda katvaks ühtseks kileks. Kui kilet moodustava ainena kasutatakse mitmesuguseid vaike (epoksü-, fenool-formaldehüüd-, glüftaalvaigud jne.), siis nimetatakse värve emailvärvideks.

Pigment annab värvile soovitud värvitooni, suurendab valguskindlust ja vastupidavust klimaatilistele mõjutustele.

Täiteained (talk, kaoliin, asbest) alandavad värvi hinda ja suurendavad kuumakindlust.

Plastifikaatorid (näit. dibutüülftalaat) annavad kilele elastsuse.

Lahustajates lahustatakse vaik ja saadakse sobiva viskoossusega segu värvimiseks. Lahustajatena kasutatakse lenduvaid orgaanilisi aineid (atsetoon, toluool, tsükloheksanool, piiritus jt.).

Pooljuhtide tööstuses soovitatakse kasutada järgmisi emailvärve: ЭЭ-341-1, ЭП-716, МЦ-11, ПФ-28.

Emaili ЭЭ-341-1 sideaineks on epoksüvaik, pigmendiks tahm ja täiteaineks talk. Vahetult enne värvimist segatakse email kõvendajaga, milleks on mitmesugused amiinid (heksametüleendiamiin, polüetüleenpolüamiin). Lahustajatega (atsetoon, tsükloheksanool) saadakse töötamiseks sobiv viskoossus ~ 13° E. Pärast kõvendajaga segamist on värv tarvitamiseks kõlblik ühe tunni jooksul.

3.8. VAIGUD, VAHAD JA PLASTMASSID

V a i g u d on klaasja ehitusega orgaanilised ained. Soojendamisel nad pehmenevad ja sulavad. Vaigud lahustuvad mitmesugustes orgaanilistes lahustajates. Vaigud jaotatakse termoplastilisteks (kuumutamisel ei muuda oma füüsikalisi omadusi) ja termoreaktiivseteks (kuumutamisel muutuvad kõvaks ja lahustumatuks). Päritolult on vaigud kas looduslikud (kampol, šellak) või sünteetilised (epoksü-, polüvinüül-, räniorgaanilised vaigud jt.).

Kampolit saadakse okaspuude vaigust. Ta on habras klaasjas materjal, lahustub piirituses ja atsetoonis. Kampol koosneb peamiselt vaikhapetest üldvalemiga $C_{20}H_{30}O_2$. Kampolit kasutatakse jootmisel flussina.

Sünteetilisi vaike kasutatakse lakkide ja värvide valmistamiseks.

V a h a d on keeruka ehitusega orgaanilised ained. Neil on kristalliline struktuur ja kindel sulamistäpp, mispoolest nad erinevad vaikudest.

M e e v a h a on mesilaste elutegevuse saadus. Ta on pehme, kollase värvusega ja meeldiva iseloomuliku lõhnaga.

Parafiini saadakse nafta ümbertöötamisel. Tema sulamistäpp oleneb puhtuse astmest; ligikaudu on see 320° K (~ 50° C).

Parafiini ja vaha kasutatakse söövitamisel mittesöövitatavate alade maskeerimiseks.

P l a s t m a s s i d. Mitmesuguste taarade ja rakiste valmistamiseks kasutatakse laialdaselt plastmasse. Levinumad on orgaaniline klaas, vinüülplast, polüetüleen ja fluoroplast. Orgaaniliseks klaasiks (pleksiklaasiks) nimetatakse läbipaistvat plastmassi polümetüülmetakrülaati. Ta on vastupidav piiritusele, õlidele, veele ja leelistele. Lahustub atsetoonis, diklooretaanis, bensoolis, äädikhappes. Orgaaniline klaas on hästi liimitav.

Vinüülplast ja polüetüleen on vastupidavad agressiivsele keskkonnale. Nendest valmistatakse torusid, valamuid, keemilise aparatuuri osi, mis ei tööta kõrgetel temperatuuridel. Nendest valmistatud detailid on hästi keevitatavad.

Fluoroplast on suhteliselt uus materjal. Molekuli ehituselt sarnaneb ta polüetüleeniga, kus vesiniku aatomid on asendatud fluori aatomitega. Ta on vastupidav kõigile hapetele, leelistele ja lahustajatele. Fluoroplast töötab kõrgel temperatuuril kuni 520° K (~ 250° C). Temast valmistatakse söövitusnõusid ja keemilise aparatuuri osi. Fluoroplasti ei saa liimida.

3.9. MATERJALID *p-n*-SIIRDEID KAITSVA KESKKONNA LOOMISEKS

Pooljuhtseadise töö sõltub oluliselt *p-n*-siirde pinna olukorrast ja ümbritseva keskkonna toimest. Siirete kaitsmiseks ümbritseva keskkonna mõju eest (veeaur, hapnik jne.) kasutatakse järgmisi mooduseid: 1) siirete katmine lakkidega (polümeerid); 2) niiskust siduvate ainete, s. o. adsorbentide paigutamine pooljuhtseadise korpusesse (tseoliit, kaltsium) ja 3) siirete katmine räniorgaaniliste vaseliinidega.

Siirdeid kaitsvad materjalid peavad olema väikese keemilise aktiivsusega, suure eritakistusega, temperatuurikindlad ega tohi laguneda aja jooksul.

Lakid kujutavad endast kilet moodustavate vaikude lahuseid kergesti lenduvates orgaanilistes lahustajates. Põhiliselt kasutatakse siirete kaitsmiseks räniorgaanilisi lakke, millesse viiakse orgaanilisi lisandeid.

Peale lakkide on välja töötatud täiesti uued kattematerjalid, mida nimetatakse tinglikult räniorgaanilisteks vaseliinideks. Need ühendid säilitavad püsiva viskoossuse pooljuhtseadiste töötemperatuuri piirkonnas ja ei tekita seetõttu siiretes mehaanilisi pingeid. Räniorgaanilised vaseliinid on hästi puhastatavad.

Siirete kaitsmiseks niiskuse eest kasutatakse veel tseoliiti ja kaltsiumi. Tseoliit viiakse pooljuhtseadise korpusesse mõnemikromeetristest kristallikestest koosneva pulbri või tableti kujul. Tablett kinnitatakse kübara külge.

Tseoliit on väga efektiivne adsorbent. Ta kujutab endast kristallilist alumosilikaati. Tseoliidi omapäraks on tema koostises olev nõrgalt seotud vesi, mis eraldub kuumutamisel 673 ... 873° K (400 ... 600° C) juures. Jahtunult seob tseoliit enesega uuesti vett. Kuni 473° K-ni (200° C-ni) sõltub tseoliidi adsorbtsioonivõime temperatuurist ja keskkonnas olevast niiskusest vähe.

Teiseks kasutatakse pooljuhtseadistes niiskuse neelajana kaltsiumi. Kaltsium reageerib energiliselt veeauruga ja on seega sobiv materjal niiskuse sidumiseks. Kaltsium kinnitatakse tableti kujul transistori kübara põhja külge.

Siirete üheaegseks kaitsmiseks nii mehaaniliste mõjude kui ka niiskuse eest kasutatakse räniorgaanilise vaseliini ja tseoliidi segu.

4. TEHNOLOOGILISED ABIMATERJALID

4.1. GAASID

Gaaside üldiseloomustus. *p-n*-siirded valmistatakse tavaliselt gaasilises keskkonnas. Selleks võivad olla vesinik, lämmastik või mõni inertgaas, tavaliselt argoon või heelium. Ka pooljuhtseadiseid monteeritakse tihti kuivatatud gaasi keskkonnas.

Lämmastik ja inertgaasid takistavad pooljuhtmaterjalide oksüdeerumist, nad moodustavad seega neutraalse keskkonna. Vesinikul on tugevad taandavad omadused. Seetõttu viiakse kõrgetel temperatuuridel toimuvad protsessid tavaliselt läbi vesiniku keskkonnas.

Allpool kirjeldatakse lühidalt pooljuhtide tööstuses kasutatavate tähtsamate gaaside füüsikalisi ja keemilisi omadusi.

Vesinik (H_2) on värvusetu lõhnatu gaas. Ta on kõige kergem gaasidest (1 m^3 kaalub 0,09 kg). Keemistemperatuur on 20° K (—253° C). Vesinik põleb värvusetu leegiga. Kui süüdata segu, mis koosneb 2 osast vesinikust ja 1 osast hapnikust, tekib reaktsioon plahvatuse kujul. Seda segu nimetatakse paukgaasiks. Vesinikuleegi temperatuur on küllalt kõrge — 1273° K (1000° C). Vesinikuga töötamisel tuleb olla äärmiselt ettevaatlik, kuna õhu sattumisel vesinikku võib tekkida plahvatav segu.

Lämmastik (N_2) on värvusetu lõhnatu gaas. Värvusetu on ta ka vedelal ja tahkel kujul. Lämmastiku keemistemperatuur on 77° K (—196° C). Lämmastiku molekulis on kaks aatomit. Toatemperatuuril on lämmastiku molekul keemiliselt inertne. Kuumutamisel reageerib lämmastik mõnede metallidega. Väga kõrgel temperatuuril ühineb hapniku ja vesinikuga.

Argoon (Ar) on inertgaas, s. t. ta ei reageeri ühegi ainega. Argooni molekul koosneb ainult ühest aatomist, keemistemperatuur on 87° K (—186° C). Argoon on värvusetu, õhust peaaegu kaks korda raskem gaas (1,781 kg/m^3). Pooljuhtide tööstuses kasutatakse argooni monokristallide kasvatamisel, elektroodsulamite valmistamisel ja ka pooljuhtseadiste montaaži jaoks inertse keskkonna loomiseks.

Heelium (He) on värvusetu lõhnatu gaas. Heeliumil on inert-

gaasidest kõige väiksem tihedus — 0,179 kg/m³. Heelium läbib kvartsi ja kõrgetel temperatuuridel portselani. Keemistemperatuur on 4° K (—269° C). Vedela heeliumi aurustamisel saadakse kõige madalam teadaolev temperatuur — ainult mõni kümnendik kraadi kõrgem absoluutsest nullist. Heeliumi kasutatakse samaks otstarbeks nagu argoonigi.

Gaasid peavad olema puhastatud tolmust, veeaurust ja teiste gaaside lisanditest, kuna sellest sõltub pooljuhtseadiste kvaliteet.

Vesiniku puhastamine. Hapniku ja veeauru sisaldav vesinik juhitakse rotameetri kaudu puhastisse. Puhasti on roostevabast terasest silinder, mis on täidetud palladeeritud silikageeli või alumogeeliga. Vesinik süttib pallaadiumi (katalüsaator) juuresolekul hapnikuga kokku puutudes.

Tekib reaktsioon

$$2H_2 + O_2 \xrightarrow{Pd} 2H_2O.$$

Seega reageerib vesinikus olev hapnik puhasti vesinikuga. Hapniku osa vesinikus väheneb tunduvalt. Vesiniku ja hapniku reaktsiooni tagajärjel soojeneb gaas, mis juhitakse edasi jahutisse. Gaasis sisalduva veeauru hulk suurenes eelmise reaktsiooni tagajärjel. Jahutis kondenseerub osa veeauru veeks. Jahutist suunatakse veel küllaltki niiske gaas kuivatisse. Kuivati kujutab endast adsorbendiga täidetud metallsilindrit. Kuivatis veeaur adsorbeerub adsorbendi pinnale ja vesinik vabaneb veeaurust.

Ühekordse puhastamise järel saadakse vesinik kastepunktiga 223° K (—50° C) ja hapnikusisaldusega $5 \cdot 10^{-4} \ldots 2 \cdot 10^{-4}$%. Tavaliselt korratakse puhastustsüklit veel kord, mille tagajärjel saadakse vesinik kastepunktiga 208° K (—65° C) ja hapnikusisaldusega $1 \cdot 10^{-4}$%.

Lämmastiku puhastamine. Lämmastiku puhastamine on analoogiline vesiniku puhastamisega. Enne lämmastiku suunamist puhastisse lisatakse talle 1 ... 3% vesinikku, et toimuks reaktsioon vesiniku ja lämmastikus sisalduva hapniku vahel. Lämmastikku tavaliselt kahte korda ei puhastata.

Adsorbendid. Õhu ja gaaside kuivatamiseks veeaurust kasutatakse mitmesuguseid hügroskoopseid aineid, nn. adsorbente. Tähtsamad adsorbendid on silikageel, alumogeel ja tseoliit.

Silikageeli saadakse naatriumsilikaadi töötlemisel soolhappega. Silikageel on poorne materjal poori raadiusega 1,5 ... 3,0 nm ja tera suurusega 2,8 ... 7 mm. Silikageeli regenereerimiseks kuivatakse teda temperatuuril 423° K (150° C).

Silikageeli niiskusmahtuvus õhu 20%-lise suhtelise niiskuse juures on 13% kuivast kaalust.

Alumogeel on termiliselt töödeldud aktiivne poorne alumiiniumoksiid. Ta on vähem levinud kui silikageel.

Tseoliit on sünteetiline kristalliline adsorbent — alumosilikaat.

Looduses tuntakse 35 erinevat tüüpi tseoliiti, sünteesitud on 20 tüüpi.

Tseoliiti toodetakse $Al(OH)_2$ ja NaOH omavahelise reaktsiooni tulemusena tekkinud naatriumaluminaadi reageerimisel vesiklaasiga. Pulbrikujulisele tseoliidile lisatakse savi (kuni 15%), granuleeritakse ja aktiviseeritakse (põletatakse 923° K (650° C) juures). Igal tseoliiditüübil on kindla läbimõõduga poorid — NaA-l 0,4 nm (on võimeline adsorbeerima molekule läbimõõduga kuni 0,4 nm), CaA-l 0,5 nm. Tseoliidi adsorbtsiooniomadusi käsitleti § 3. 9.

K a s t e p u n k t. Gaasides sisalduva veeauru hulka hinnatakse tihti kastepunkti järgi. Igal kindlal temperatuuril on iga gaasi jaoks kindel maksimaalne veehulk, mis püsib auruna gaasis, ülejäänu kondenseerub välja. Sellist gaasi, mis sisaldab antud temperatuuril maksimaalset veeauru hulka, nimetatakse küllastunud gaasiks (veeauru suhtes) ja seda temperatuuri antud gaasi kastepunkti temperatuuriks. Kui alandada gaasi temperatuuri veel näiteks 1° võrra, sadeneb osa auru välja, sest madalamal temperatuuril on gaasi küllastava auru hulk väiksem. Tabelitest võib leida kastepunkti igale temperatuurile vastava veeaurusisalduse gaasis (mg/m³). Kastepunkti kasutatakse gaaside puhtuse määramiseks. Gaasi jahutatakse, kuni algab veeauru kondenseerumine, mõõdetakse temperatuur ja tabelist leitakse vastav veeaurusisaldus gaasis. Praktiliselt hinnatakse pooljuhtide tööstuses gaasi puhtust veeaurust lihtsalt — gaasi kastepunktiga (näit. —60° C või —65° C jne.). Mida madalam on kastepunkt, seda puhtam gaas.

G a a s i h u l g a j a r õ h u m õ õ t m i n e. Töötamisel gaasidega on vaja teada peale gaaside puhtuse ka gaaside kulu ja rõhku.

Pooljuhtide tööstuses kasutatakse gaaside kulu mõõtmiseks peamiselt rotameetreid. Rotameeter kujutab endast vertikaalset koonuselist klaastoru, peenem ots allapoole. Klaastorusse on asetatud vabalt ujuk. Ujuki alumine osa kujutab endast koonust, pealmises osas on laiem äärik. Ujuki materjaliks on kerge metall või plastmass. Ujuki raskuskese on viidud alumisse ossa. Mõõdetav gaas läbib koonuselist klaastoru alt üles ja haarab enesega kaasa ujuki, mis hakkab oma spetsiaalse ehituse tõttu pöörlema. Olenevalt gaasi kulust asetub ta kas kõrgemale või madalamale. Olenevalt ujuki kõrgusest on võimalik määrata rotameetrit läbiva gaasi hulka (l/tunnis; m³/tunnis, l/min jne.).

Gaaside rõhu mõõtmiseks kasutatakse peamiselt manomeetreid. Tavaliselt kasutatavate manomeetrite töö põhineb mõõdetava rõhu mõjul spetsiaalsete vedrude elastsel deformatsioonil. Selle deformatsiooni suurus antakse edasi manomeetri osutile või isekirjutavale seadmele. Manomeetri skaala, millel liigub osuti, on graduee-ritud rõhuühikutes.

4.2. VESI

Nõudeid pooljuhtide tööstuses kasutatavale veele. Pooljuhtide tööstuses kasutatakse vett mitmesuguste lahuste ja söövitajate valmistamiseks ning detailide pesemiseks.

Teatavasti sõltuvad pooljuhi omadused väga suurel määral tema pinna puhtusest. Söövitamisega eemaldatakse kristalli pindmine kiht ja koos sellega ka pinnal olev mustus. Järgneva pesemise eesmärgiks on kõrvaldada pinnalt happe ja söövitamisproduktide (soolade) jäljed. Kui kasutatav vesi ei ole väga puhas, siis adsorbeeruvad (kleepuvad) pooljuhi pinnale uuesti mitmesuguste metallide ja soolade ioonid.

Vee puhtuse hindamiseks kasutatakse järgmisi näitajaid:

1) eritakistus MΩcm;
2) kuivjääk mg/l.

Vee elektrijuhtivus on tingitud vees leiduvatest ioonidest. Absoluutselt puhta vee eritakistus on 17 ... 20 MΩcm. Kuivjäägi leidmiseks aurutatakse kuivaks 1 l vett ja kaalutakse saadud jääk.

Pooljuhtide tööstuses kasutatava vee eritakistus peab olema üle 5 MΩcm ja kuivjääk mitte üle 1,2 mg/l. Seoses üha täiuslikumate puhastusseadmete kasutuselevõtmisega on nõuded vee puhtusele aasta-aastalt kasvanud.

Vee puhastamise viisidest on enam levinud destilleerimine ja deioniseerimine. Vee dialüüsimist kõrgepingega kasutatakse harvemini.

Vee destilleerimine. Destilleerimiseks nimetatakse vee muutmist auruks ja auru kondenseerimist uuesti veeks. Aurustumisel jäävad vees leiduvad lisandid aurustamisnõusse. Siiski ei saa destilleerimisega küllalt puhast vett. Vee eritakistus pärast destilleerimist on 100 ... 200 kΩcm, kuivjääk üle 1 mg/l. Teistkordsel destilleerimisel (nn. bidestilleerimisel) õnnestub vee eritakistust suurendada kuni 500 kΩcm-ni. Suurema eritakistusega vett on destilleerimise teel peaaegu võimatu saada, sest aparatuuri seintest lahustub alati vette metallide ioone (klaasi puhul K^+ ja Na^+).

Ioonvahetusseadmed. Mitteorgaanilised lisandid on vees lahustunud olekus ioonidena: Fe^{+++}, Cu^{++}, Ca^{++}, Al^{+++}, Na^+, K^+, NO_3^-, Cl^-, SO_4^{--} jne. Neid ioone võib kinni püüda spetsiaalsete ainete, nn. ioonvahetusvaikudega. Positiivseid ioone ehk katioone kinnipüüdvaid vaike nimetatakse kationiitideks, negatiivseid ioone ehk anioone kinnipüüdvaid — anioniitideks. Ioonvahetusvaigud on suure molekulmassiga sünteetilised vaigud, mis sisaldavad aktiivseid OH^-- ja H^+-rühmi. Tinglikult tähistatakse ioonvahetusvaike järgmiselt:

kationiit R—H
anioniit R—OH,

kus R tähistab vaigu orgaanilist radikaali.

Ioonvahetusvaikudega puhastatud vett nimetatakse deioniseeritud veeks. Deioniseerimisseade koosneb kahest orgaanilisest klaasist kolonnist (joon. 60). Kolonnid on omavahel ühendatud polüetüleentoruga. Kolonn *1* on täidetud kationiidiga. Vee läbimisel kolonnist püütakse metallide ioonid kinni ja asendatakse vesinikiooniga:

$$2R—H + Ca^{++} \rightarrow R_2—Ca + 2H^+.$$

Järgnevalt juhitakse vesi anioniidiga täidetud kolonni *2*. Negatiivsed ioonid asendatakse vees hüdroksiidiooniga:

$$R—OH + Cl^- \rightarrow R—Cl + OH^-.$$

Vesinikioon ja hüdroksiidioon liituvad veeks:

$$H^+ + OH^- \rightarrow H_2O.$$

Deioniseeritud veel on väga kõrge eritakistus —

10 . . . 15 MΩ cm.

Töötamisel vaigud küllastuvad metalli ja happejäägi ioonidega, mistõttu vaikude töövõime langeb. Vee eritakistus hakkab langema.

Vaikude töövõime taastamiseks regenereeritakse nad. Selleks pestakse kationiiti happelahusega (HCl 4%-line lahus). Toimub reaktsioon

$$R_2 — Ca + 2HCl \rightarrow 2R—H + CaCl_2.$$

Anioniiti pestakse leelislahusega (4%-se NH_4OH lahusega):

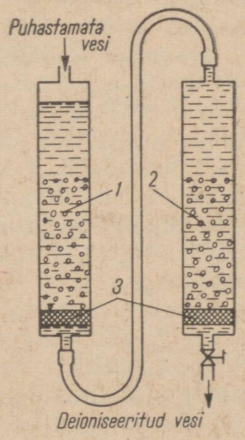
$$R — Cl + NH_4OH \rightarrow R—OH + NH_4Cl.$$

Pärast regenereerimist on vaja vaikusid happest ja leelisest hästi puhtaks pesta.

Deioniseeritud vee saamiseks võib kasutada kraanivett, kuid kuna kraanivesi sisaldab palju sooli, küllastuvad vaigud kiiresti. Regenereerimiste vahelise perioodi pikendamiseks on otstarbekas kasutada deioniseerimiseks eelnevalt destilleeritud vett.

Kui kõrgeoomilist deioniseeritud vett hoida avatud nõus õhu käes, siis tema takistus langeb väga kiiresti. Seda põhjustab CO_2 neeldumine õhust. Ka klaasanumas langeb vee takistus kiiresti, kuna klaasist lahustub vette K^+ ja Na^+ ioone.

Deioniseeritud vett tuleb säilitada tihedalt suletud polüetüleennõus.



Joon. 60. Vee deioniseerimise seadme põhimõtteline skeem:
1 — kolonn kationiidiga; *2* — kolonn anioniidiga; *3* — filtrid

4.3. HAPPED, ALUSED JA SOOLAD

Hapetele on iseloomulikud järgmised omadused:

1. hapu maitse;
2. võime muuta paljude indikaatorite värvust (näiteks värvida lakmust punaseks);
3. võime lahustada mõningaid metalle, eraldades seejuures vesinikku;
4. võime reageerida alustega, moodustades soolasid.

Kõik need hapete omadused ilmnevad ainult lahustes ja seejuures peaaegu eranditult vesilahustes. Nii näiteks ei ole kuival kloorvesinikul või tema lahusel bensoolis happelisi omadusi, ta isegi ei värvi lakmuspaberit punaseks. Kloorvesiniku lahus vees — soolhape — on aga üks tüüpilisemaid happeid.

Vesilahustes ei esine mitte hapete molekulid, vaid peamiselt vabad ioonid. Arusaadavalt sõltuvad nende lahuste omadused ioonide, aga mitte molekulide omadustest.

Et iga happe dissotsiatsioonil tekivad tingimata vesinikioonid, siis on kõigi hapete ühiste omaduste kandjateks just nemad. Vesinikioonid värvivad lakmuse punaseks, reageerivad metallidega, annavad hapetele hapu maitse jne.

Kuna happeliste omaduste kandjad on vesinikioonid, siis on hape seda tugevam, mida suurem on vesinikioonide kontsentratsioon lahuses. Tugevad happed on näiteks sool ja lämmastikhape.

Hapete tugevuse üle saab otsustada mitmesuguste reaktsioonide põhjal, mille juures eraldub vesinik. Kõige kiiremini eraldub vesinik soolhappest, tunduvalt aeglasemalt fosforhappest ja väga aeglaselt äädikhappest. Järelikult osutub kolmest nimetatud happest kõige tugevamaks soolhape ja kõige nõrgemaks äädikhape.

S o o l h a p e. Soolhape tekib gaasilise kloorvesiniku HCl lahustumisel vees. Puhas soolhape on kloorvesinikule omase terava lõhnaga värvusetu vedelik. Tavaline kontsentreeritud soolhape sisaldab umbes 37% HCl ja tema tihedus on 1,19 g/cm^3. Tehnilisel otstarbel kasutatav soolhape on lisandite (peamiselt $FeCl_3$) tõttu kollase värvusega ja sisaldab umbes 27,5% HCl.

Kontsentreeritud soolhappe keetmisel lendub algul HCl ühes vähese veega. See toimub seni, kuni jääk sisaldab umbes 20% HCl. Edasi lendub HCl koos veega. Vastupidi, lahjendatud soolhappe keetmisel lendub kõigepealt vesi. Kui jäägi kontsentratsioon on 20%, hakkab vedelik koostise muutumiseta auruma. Soolhape reageerib kergesti paljude metallidega, eraldades vesinikku ja moodustades soolasid — kloriide.

Kontsentreeritud soolhape «suitseb» õhus, sest tema aur moodustab õhuniiskusega peene udu.

Pooljuhtmaterjalide söövitamisel kasutatakse kõrge puhtusastmega soolhapet, et vältida mittesoovitavate lisandite sattumist pooljuhi pinnale.

F l u o r v e s i n i k h a p e. Fluorvesinikhape on gaasilise fluorvesiniku HF lahus vees. Ta dissotsieerub vees väga vähe.

Fluorvesiniku märkimisväärseks omaduseks on tema võime reageerida klaasi koostisse kuuluva ränidioksiidiga (SiO_2), moodustades gaasilise ränitetrafluoriidi SiF_4 ja vee:

$$SiO_2 + 4HF = SiF_4 + 2H_2O.$$

Sellel reaktsioonil põhineb fluorvesinikhappe kasutamine pooljuhtmaterjalide söövitamisel.

Fluorvesinikhappe aur on mürgine. Nahale sattunud, tekitab kontsentreeritud fluorvesinikhape raskeid põletushaavu, mis muutuvad raskesti paranevateks haavanditeks. Seepärast nõuab tema käsitsemine suurt ettevaatust.

L ä m m a s t i k h a p e. Puhas lämmastikhape on värvusetu vedelik. Pooljuhtmaterjalide söövitamiseks kasutatakse kontsentreeritud 68 . . . 70%-list lämmastikhapet, mille tihedus on 1,4 g/cm^3.

Lämmastikhape ei ole keemiliselt eriti stabiilne. Juba valguse mõjul laguneb ta aeglaselt veeks, hapnikuks ja lämmastikdioksiidiks:

$$4HNO_3 = 2H_2O + 4NO_2 + O_2.$$

Lämmastikhappe kõige iseloomulikumaks omaduseks on tema oksüdeerimisvõime. Ta on üks tugevamaid oksüdeerijaid. Paljud mittemetallid oksüdeeruvad kergesti tema toimel, muundudes vastavateks oksiidideks. Lämmastikhape oksüdeerib ka paljusid orgaanilisi aineid, mistõttu teda kasutatakse plaatide ja kristallide rasvast vabastamiseks.

Segu, mis koosneb ühest ruumalaühikust lämmastikhappest ja kolmest ruumalaühikust soolhappest, nimetatakse kuningveeks. Kuningvesi lahustab mõningaid metalle, sealhulgas ka kulda, mis lämmastikhappes ei lahustu. Tema toime seletub sellega, et lämmastikhape oksüdeerib soolhapet, kusjuures tekib nitrosüülkloriid NOCl:

$$HNO_3 + 3HCl = Cl_2 + 2H_2O + NOCl.$$

Nitrosüülkloriid on reaktsiooni vaheprodukt, mis laguneb lämmastikoksiidiks ja klooriks:

$$2NOCl = 2NO + Cl_2.$$

Eralduv kloor ühineb metallidega, moodustades kloriide. Järelikult saadakse metallide lahustamisel kuningvees mitte lämmastikhappe, vaid soolhappe soolad:

$$Au + 3HCl + HNO_3 = AuCl_3 + NO + 2H_2O.$$

Lämmastikhappega töötamisel tuleb jälgida, et hape ei satuks nahale ega riietele. Sinna sattunud piisad tuleb eemaldada veega pesemise teel või neutraliseerida soodalahusega.

Äädikhape. Äädikhape on esimene hape, mida inimene tundma õppis. Veevabas olekus kujutab ta endast tahket jäätaolist massi (siit ka nimetus — jää-äädikhape). Ta sulab temperatuuril 16,5° C ja keeb 118° C juures.

Äädikhape seguneb veega ükskõik millises vahekorras. Äädikhapet tarvitatakse väga paljudes keemiatööstuse harudes mitmesuguste värvainete, ravimite, kunstkiu, plastmasside jne. tootmisel. Äädikhapet kasutatakse reaktsiooni aeglustajana pooljuhtmaterjalide söövitamisel.

Väävelhape. Puhas väävelhape on värvusetu õline vedelik. Kontsentreeritud väävelhape sisaldab tavaliselt 96,5% H_2SO_4 ja tema tihedus on 1,84 g/cm³. Väävelhappe lahustumisel vees eraldub soojust hüdraatide moodustumise tõttu ($H_2SO_4 \cdot 2H_2O$, $H_2SO_4 \cdot 4H_2O$ jne.), mistõttu tuleb väävelhappe lahjendamisel olla väga ettevaatlik. Tuleb vältida liiga kiiret lahuse kuumenemist, millega võib kaasneda tema laialipritsimine. Lahuste valmistamisel tuleb hapet valada väikeste hulkadena vette, aga mitte vett happesse. Pärast iga happeportsjoni lisamist tuleb lahust segada.

Väävelhape absorbeerib veeaure ja teda kasutatakse seepärast sageli gaaside kuivatamiseks. Väävelhape kuulub tugevate hapete hulka.

Kontsentreeritud väävelhappe ja kaalium- või naatriumdikromaadi segu tuntakse tugeva oksüdeerijana kroomsegu nime all ja teda kasutatakse klaasnõude puhastamiseks. Kroomsegu oksüdeerib ja lahustab mustuse.

Vesinikperoksiid H_2O_2. Puhas vesinikperoksiid on peaaegu värvusetu, siirupitaoline vedelik. Tema tihedus on 1,46 g/cm³ ja ta tahkub —1,7° C juures, moodustades nõelataolisi kristalle. Vesinikperoksiid on väga ebapüsiv aine; ta võib plahvatusega laguneda veeks ja hapnikuks, kusjuures eraldub soojust:

$$2H_2O_2 = 2H_2O + O_2 + 46 \text{ kcal.}$$

Püsivamad on vesinikperoksiidi vesilahused, mis võivad jahedas kohas säilida üsna kaua. Soojendamine ja valgus kiirendavad lagunemisprotsessi: lahusest hakkavad eralduma hapnikumullikesed ja lõpuks jääb järele puhas vesi. Vesinikperoksiid laguneb vesilahuses ioonideks. Mõnede alustega astub vesinikperoksiid vahetusreaktsiooni, moodustades soolasid. Vesinikperoksiidi soolasid nimetatakse peroksiidideks. Vesinikperoksiidil on kahealuselise happe omadused.

Vesinikperoksiidi kõige iseloomulikumaks keemiliseks omaduseks on tema tugev oksüdeerimisvõime; ta suudab oksüdeerida väga paljusid aineid, nagu pooljuhtide pinda, mitmesuguseid värvaineid jne. Pooljuhtide pinna oksüdeerimiseks kasutatakse 30%-list vesinikperoksiidi. Arstiteaduses kasutatakse vesinikperoksiidi 3%-list lahust desinfitseerimisvahendina.

Alused. Alustel on järgmised üldomadused:

1) omapärane seebi maitse;
2) võime muuta indikaatorite värvust, näiteks värvida lakmust siniseks;
3) võime reageerida hapetega, moodustades soolasid.

Et kõigi aluste lahused sisaldavad hüdroksiidioone, siis on selge, et aluseliste omaduste kandjaks on hüdroksiidioon. Ioonide teooria seisukohalt on alused elektrolüüdid, mis dissotsieeruvad vesilahustes, eraldades hüdroksiidioone.

Aluste nagu hapetegi tugevus oleneb nende dissotsiatsiooniastmest. Kõige tugevamad alused on naatrium- ja kaaliumhüdroksiid, mis vesilahustes on peaaegu täielikult dissotsieerunud.

N a a t r i u m - j a k a a l i u m h ü d r o k s i i d. Naatrium- ja kaaliumhüdroksiid on tugevasti hügroskoopsed valged tahked ained. Et naatrium- ja kaaliumhüdroksiid söövitavad tugevasti riiet, nahka, paberit ja teisi orgaanilisi aineid, siis nimetatakse neid ka sööbenaatriumiks ja sööbekaaliumiks.

Nende lahustamisel vees eraldub mitmesuguste hüdraatide moodustumise tõttu soojust. Seepärast tuleb nende lahuste valmistamisel ettevaatlik olla, et vältida lahuse pritsimist nahale või riietele.

Naatrium- ja kaaliumhüdroksiidi tuleb säilitada hästi suletud anumates, sest nad neelavad kergesti õhust süsinikdioksiidi, muutudes järk-järgult naatriumkarbonaadiks.

S o o l a d. Soolasid võib vaadelda kui elektrolüüte, mis vees lahustumisel dissotsieeruvad, eraldades vesinikioonidest erinevaid negatiivseid ioone. Ei ole niisuguseid ioone, mis oleksid ühised kõikide soolade lahustele, seepärast ei ole sooladel ka ühiseid omadusi.

Üldiselt dissotsieeruvad soolad seda paremini, mida väiksem on soola moodustavate ioonide valents. Osa sooli lahustub vees sedavõrd halvasti, et praktiliselt loetakse nad mittelahustuvaks.

4.4. GRAFIIT

Süsinikul on kolm allotroopset teisendit: teemant, grafiit ja süsi. Grafiit on kristalliline aine. Grafiiti saadakse spetsiaalsete maakide rikastamise teel. Kunstlikult võib grafiiti saada söe ümberkristalliseerimisel temperatuuril 2500 ... 2800° K (2200 ... 2500° C). Grafiidil on kihiline kristallivõre. Grafiidi tihedus on 2,3 g/cm^3, sulamistemperatuur 3973° K (3700° C). Kuumutamisel kuni 443° K (170° C-ni) grafiit õhuga ei reageeri. Ta hakkab õhu käes põlema temperatuuril üle 873° K (600° C). Põlemise kiirus oleneb temperatuurist ja hapniku hulgast. Orgaanilistes lahustajates grafiit ei lahustu. Väävelhape, soolhape, fluorvesinikhape ja kuningvesi ei reageeri grafiidiga mitte mingisuguse temperatuuri juures. Samuti ei reageeri grafiit lahjendatud alustega. Keemiliselt võib grafiiti töödelda HNO_3 ja H_2SO_4 segus 1 : 2.

Pooljuhtide tööstuses valmistatakse grafiidist kassette, tiigleid, kuumutuskehasid jne. Töötamisel määrduvad grafiidist esemed kiiresti ja neid tuleb perioodiliselt puhastada. Seda tehakse tavaliselt emmal-kummal viisil:

1) detailid keedetakse sool- ja lämmastikhappe segus, pestakse deioniseeritud veega ja lõõmutatakse 1473 ... 1873° K (1200 ... 1600° C) juures. Puhtus määratakse spektraalanalüüsiga;

2) lõõmutatakse kloori keskkonnas 1523° K (1250° C) juures 4 ... 5 tundi.

4.5. KVARTS

Kvarts on ränidioksiid. Tavaliselt saadakse kvartsi puhta räniliiva sulatamisel. Pooljuhtide tööstuses kasutatavat eriti puhast kvartsi saadakse sünteetiliselt. Kvartsil on väga väike ruumpaisumistegur ($5{,}8 \cdot 10^{-7}$) ja kõrge sulamistemperatuur —1573° K (1300° C). Kvarts laseb läbi nii ultravioletset kui ka infrapunast kiirgust. Ta on üks paremaid dielektrikuid ja väga püsiv vee ning hapete suhtes. Kvarts aurustub kõrgetel temperatuuridel vaakuumis. Sulatatud kvarts on väga viskoosne ja seetõttu on temast raske eraldada gaasimullikesi.

Pooljuhtide tööstuses kasutatakse kvartsi difusiooniprotsessidel kasutatavate ampullide, vaakuumahjude torude, kuumakindlate taarade ja vaakuumseadmete detailide valmistamiseks. Väga puhast kvartsi kasutatakse pooljuhtmaterjalide tööstuses tiiglite valmistamiseks.

5. POOLJUHTMATERJALIDE MEHAANILINE TÖÖTLEMINE

5. 1. ABRASIIVMATERJALID

Pooljuhtmaterjalid (germaanium, räni jt.) on küllaltki kõvad ja väga haprad. Nende mehaaniliseks töötlemiseks tuleb kasutada materjale, mis on veelgi kõvemad. Niisugusteks materjalideks on abrasiivmaterjalid.

Looduslikest abrasiivmaterjalidest on põhilised räni ühendid ja teemant.

Abrasiivmaterjalide valmistamiseks kasutatakse räniliiva ja ränikivi klibu, mis sisaldavad üle 97% ränidioksiidi SiO_2.

Korund on mineraal, mis põhiliselt koosneb kristallilisest alumiiniumoksiidist Al_2O_3 vähese kvartsi ja teiste materjalide lisanditega. Looduses esineb palju erinevaid korundivariante.

Teemant kujutab endast süsiniku allotroopset teisendit. Tuntud looduslikest ja kunstlikest abrasiivmaterjalidest on teemant kõige kõvem. Tööstuses kasutatavaid teemante nimetatakse tehnilisteks teemantideks. Neid kasutatakse kõige vastutusrikkamate ja täpsemate tööde juures.

Kõigi looduslike abrasiivmaterjalide (välja arvatud teemant) puuduseks on kõrvalainete sisaldus, mis halvendab lõikeomadusi.

Kunstlike abrasiivainete hulka kuuluvad elektrokorund, karborund ja boorkarbiid.

Elektrokorund on kristalliline, mõningate lisanditega alumiiniumoksiid. Teda saadakse elektriahjudes sulatamise teel, millele järgneb peenestamine.

Olenevalt alumiiniumoksiidi sisaldusest eristatakse kunstlikke kolme liiki korunde: normaalne elektrokorund (mark Э), valge elektrokorund (mark ЭБ) ja monokorund. Monokorund kõige paremate lõikeomadustega. Kunstlik korund sisaldab kuni 99% alumiiniumoksiidi.

Karborund (ränikarbiid) on kunstlik abrasiivmaterjal, mis koosneb ränikarbiidi SiC teradest. Teda saadakse elektriahjus sulatamise teel, millele järgneb peenestamine. Karborundi valmistamise lähtematerjaliks on kvartsliiv ja söepulber. Karborunditerad

on suure kõvadusega ja heade lõikeomadustega, kuid haprad. Karborundi tuntakse kahe nime all: must karborund — mark КЧ ja roheline karborund — mark К3. Kõrgema kvaliteediga on roheline karborund.

Boorkarbiid (B_4C) koosneb boorkarbiidi kristallidest ja vähesest kogusest lisandeist (boor, grafiit jt.). Ta on erakordselt kõva materjal. Kõvaduselt läheneb ta teemandile ja mõningatel juhtudel kasutatakse teda teemandi asendajana.

Kõik abrasiivmaterjalid, nii looduslikud kui kunstlikud, jaotatakse vastavalt tera suurusele gruppidesse. Teralisust ja ühtlasi ka abrasiivmaterjali marki tähistatakse olenevalt tera suurusest järgmiselt:

I rühm — abrasiivterad teralisuse numbritega 12, 14, 16, 18, 20, 24, 30, 36, 40, 46, 54, 60, 70, 80 ja 90. Tera suurus 150—2000 μm;

II rühm — lihvimispulbrid teralisuse numbritega 100, 120, 150, 180, 220, 240, 280 ja 320. Tera suurus 28 . . . 150 μm.

I ja II rühma pulbritel väheneb tera suurus teralisuse numbri suurenedes;

III rühm — mikropulbrid teralisuse numbritega M28, M20, M14, M10, M7, M5 ja M3. Tera suurus 3 . . .28 μm. Tähe M järel seisev arv näitab tera maksimaalset läbimõõtu mikromeetrites.

5.2. VALANDI ETTEVALMISTAMINE

Valandiks nimetatakse monokristalli, mis saadakse sulagermaaniumist nn. kasvatamismeetodil. Plaadiks nimetatakse valandi osa, mis on saadud pärast valandi lõikamist (saagimist) õhukesteks paralleelseteks kihtideks. Et lõigata valand plaatideks, liimitakse ta spetsiaalsele alusele, mis kinnitatakse lõikepinki. Lõikamine võib olla orienteeritud või orienteerimata. Orienteeritud lõikamisel võetakse arvesse valandi kristallograafiliste telgede suundi, orienteerimata lõikamisel neid ei arvestata.

Orienteerimata lõikamist kasutatakse käesoleval ajal harva. Põhiline on orienteeritud lõikamine. Orienteeritud lõikamisega saadud plaatidest valmistatud pooljuhttoodetel on parameetrite hajuvus väiksem.

Valandite orienteerimist teostatakse röntgeniseadmel või spetsiaalsel optilise orienteerimise seadmel. Valandil määratakse vajaliku kristallograafilise tasapinna kõrvalekalde nurk valandi geomeetrilisest teljest. Eelnevalt lihvitud ja poleeritud valandi otspinnale kantakse nool, mis näitab valandi telje kõrvalekalde suunda vajalikust kristallograafilisest tasapinnast. Kõrvalekalde nurga suurus märgitakse saatelehele. Kui on teada kõrvalekalde nurga suurus ja suund, saab lõikepingil valandile anda vajaliku orientatsiooni.

5. 3. VALANDI LÕIKAMINE

Tootmisprotsessis lõigatakse germaaniumi või räni kahel korral:

1) valand lõigatakse plaatideks;
2) plaadid lõigatakse kristallideks.

Olenevalt lõikeinstrumendi geomeetrilisest kujust ja liikumise viisist võib lõikamist liigitada järgmiselt:

1) lõikamine pöörleva kettaga;
2) lõikamine edasi-tagasi liikuvate paralleelsete lintidega;
3) lõikamine edasi-tagasi liikuva traadiga;
4) lõikamine ultraheliga.

Esialgu kasutati valandite või plaatide tükeldamiseks ainult metallketast. Pingi konstruktsioon oli väga lihtne. Lõikeketta valmistamiseks kasutati vaske, harvem terast paksusega 0,5... 0,6 mm ja läbimõõduga 80... 100 mm. Kettale anti pöörlev liikumine 60... 100 pööret minutis ja ketta ning lõigatava materjali kokkupuutekohale juhiti abrasiivsuspensiooni. Madal tootlikkus ja suured materjalikaod jäätmeteks sundisid otsima uusi võimalusi ketta paksuse ja seega ka jäätmete vähendamiseks. Praegusel ajal on eriti laialdaselt kasutusel teemantlõikeservaga lõikekettad, kusjuures lõikeservaks kasutatakse nii ketta välis- kui ka siseserva. Ketta minimaalne paksus on 0,15 mm, teemantlõikeserva paksus 0,2 mm. Lõikeserv saadakse teemandipulbri sissepressimise teel vask- või tombakketta servadesse mõlemalt poolt.

Tootlikkuse suurendamiseks ja ketta laperdamise vähendamiseks antakse kettale suur pöörlemiskiirus — kuni 10 000 pööret minutis ja isegi rohkem. Lõikekoha kuumenemise vältimiseks juhitakse pidevalt lõikekohale jahutusvett.

Valandite lõikamisel plaatideks kasutatakse sisemise teemantlõikeservaga kettaid.

Plaatide kristallideks lõikamisel kasutatakse välise teemantlõikeservaga kettaid.

Teemantlõikeserva omava kettaga lõikamise eeliseks on suur tootlikkus (lõikekiirus germaaniumi lõikamisel kuni 20 mm/min ja räni lõikamisel 10 mm/min), lõikepinna hea kvaliteet (materjali purustatud pinnakiht on õhuke) ja abrasiivsuspensiooni mittevajalikkus. Puudustena tuleb aga märkida lõigatava materjali suurt jäätmeprotsenti ja ketaste kõrget hinda, eriti suure läbimõõduga ketaste puhul. Näiteks 90-mm läbimõõduga kettale teemantlõikeserva valmistamiseks kulub ~0,5 karaati (1 k = 0,2 g) teemandipulbrit.

Valandite plaatideks lõikamise teine levinum moodus on lõikamine edasi-tagasi liikuvate teraslintide pakkidega lõikepingil. Sellisel pingil on võimalik töödelda üheaegselt kahte valandit. Lintidena kasutatakse 0,1... 0,2 mm paksusi ja 7... 8 mm laiusi termiliselt töödeldud linte terasest У8А, У10А või 65Г, kusjuures

kaasaegsetes lõikepinkides võib üheaegselt kasutada üle 100 lõikelindi. Nõutud paksusega plaatide saamiseks komplekteeritakse lõikelindid vastavatesse pingutusklambritesse; lintidele vahekauguse andmiseks kasutatakse kalibreeritud vahetükke. Selleks et vältida lintide kõverdumist lõikeprotsessil ja jäätmete suurenemist, pingutatakse linte tugevasti. See aga omakorda limiteerib lintide paksuse vähendamise võimalust. Komplekteeritud ja nõutud määrani pingutatud lintide pakid kinnitatakse pingi liuguritesse, mis liiguvad juhtpindade vahel ja mis saavad liikumispinge väntvõllilt.

Lõikepingi käitamiseks kasutatakse elektrimootorit, millelt saavad pöörlemise väntvõll ja abrasiivsuspensiooni lõikekohale juhtimise pump. Valand surutakse vastu edasi-tagasi liikuvaid linte vastukaalude abil. Lõikekohale juhitud abrasiivsuspensioonis olevad abrasiivmaterjaliterad, sattudes lintide ja valandi vahele, pressitakse ühe küljega lindi sisse, kuni lint on pehmem kui lõigatav pooljuhtmaterjal. Teise küljega hakkavad abresiiviterad kriimustama pooljuhtmaterjali, mis on vastukaalu mõjul surutud vastu liikuvaid linte.

Lintidega lõikepingi puuduseks, võrreldes teemantlõikeserva omava kettaga lõikepingiga, on väiksem tootlikkus ja lõikepinna halb kvaliteet.

Eeliseks on aga õigesti valitud lõikerežiimi puhul suurem pinnasiledus, sest lõikeprotsessil toimub plaatide lihvimine lintide külgpindadega, ja suurte valandite lõikamisel väiksem materjalikadu jäätmetena (ligikaudu 10 ... 15%).

Traadiga ja ultraheliga lõigatakse sel juhul, kui lõikesügavus pole suur, näiteks plaatide lõikamisel kristallideks.

5.4. PLAATIDE LIHVIMINE

Pärast valandi lõikamist plaadid lihvitakse, kuna pärast lõikamist (vaatamata lõikamise kvaliteedile) on plaatidel järgmised kuju ja mõõtmete ebatäpsused:

1) kõrvalekaldumine tasapinnalisusest plaadi pindade ulatuses;
2) kõrvalekaldumine plaadi pindade paralleelsuses;
3) plaadi ebatäpsus paksuses.

Plaate lihvitakse lihvimispinkidel abrasiivsuspensiooni abil. Lihvimisprotsess kulgeb järgmiselt. Klaasist lihvimiskettale valatakse abrasiivsuspensiooni, seejärel asetatakse kohale separaatorid ja separaatori igasse pesasse pannakse üks lihvitav plaat. Lihvimiseks vajaliku surve andmiseks asetatakse separaatori pesades olevatele plaatidele surujad ja neile omakorda vajalik raskus. Seejärel lülitatakse sisse abrasiivsuspensiooni etteandev pump ja lihvimisketas pannakse pöörlema. Lihvimisketta pöörlemisel hak-

kavad separaatorid, mis on asetatud fiksaatorhoiderullide vahele, pöörlema ümber oma telje. Toimub plaatide lihvimine, mis koosneb keerulisest liikumiste kombinatsioonist: pöörlev lihvimisketas paneb pöörlema separaatorid koos plaatidega ümber separaatori telje ja plaadid omakorda pöörlevad veel ümber oma telje. Niisugune keeruline protsess annab võimaluse üheaegselt lihvida kogu plaadi pinda ja tagab lihvitud pindade hea tasaparalleelsuse. Korraga lihvitakse plaatide üks pool. Teise poole lihvimiseks pööratakse plaadid separaatori pesades ringi.

Lihvimisprotsessile ja saadud plaatide täpsusele ning kvaliteedile avaldavad mõju abrasiivsuspensiooni kontsentratsioon, surve plaatidele, lihvimisketta pöörlemiskiirus, lihvimisketta tasapinnalisus, surujate tasapinnalisus ja paralleelsus lihvimiskettaga jne.

5. 5. PLAATIDE SORTEERIMINE JA PRAAGI LIIGID

Sorteerimisel kontrollitakse plaadi mõõtmete vastavust tehnoloogiale, hinnatakse töötlemise kvaliteeti ja praagitakse plaate välisilme järgi. Sorteerimisega määratakse, kas plaat on korras või on tarvis mõnda operatsiooni korrata. Sorteerija põhiliseks tööriistaks on indikaatorkell. Tuleb kontrollida, et indikaatori töölaud ja mõõtevarda kuuli pind oleksid mõõtmise juures puhtad..

Samuti ei tohi unustada, et pooljuhtmaterjalid on võrdlemisi haprad ja mõõdetavad plaadid õhukesed (paksusega vähemalt 0,5 mm). Seepärast tuleb plaate mõõta äärmiselt ettevaatlikult: mitte lasta indikaatorkella mõõtevarrast plaadile kukkuda, mitte ülemäära kõvasti suruda mõõtevardaga plaadile ja plaate hooletult mõõtepindade vahelt välja tõmmata. Sellega väldime plaatide purunemist. Mõningad sorteerimisel esinevad praagiliigid ja nende kõrvaldamise võimalused on järgmised:

1) plaadi pinnad pole paralleelsed. Kontrollida surujate ja lihvimisketta paralleelsust;

2) jooned ja kriimustused pärast lihvimist plaadi pinnal. Loputada hoolikalt separaatoreid ja lihvimisketast, vahetada abrasiivsuspensioon (lasta mikropulbril settida);

3) plaatide purunemine lihvimisel ja kontrollimisel. Plaatidega hoolikamalt ümber käia.

5. 6. ULTRAHELI

Ultraheli omadused ja saamine. Ultraheliks nimetatakse mingi keskkonna (näit. õhk, vedelik, tahke keha) mehaanilist võnkumist sagedusega üle inimkõrva kuuldepiiri — üle 20 tuhande võnke sekundis.

Ultraheli tehnilist rakendamist võimaldavad tema järgmised omadused:

1) suur läbitungimisvõime;
2) võime peegelduda kahe keskkonna piirilt;
3) võimalus saada suurt võimsust pinnaühikule — kuni 500 W/cm² (inimkõrvale tekitavad valuaistingu helivõnked võimsusega 0,01 W/cm²).

Kahte esimest omadust kasutatakse laialdaselt ultraheli defektoskoopias (varjatud defektide avastamiseks materjalis). Ultraheli kolmandat omadust kasutatakse materjalide mehaanilisel töötlemisel (lõikamine, puurimine) ja puhastamisel. Ultraheliga on võimalik töödelda selliseid kõvu ja hapraid materjale nagu germaanium, räni, klaas, keraamika jne., mida teiste võtetega on väga raske töödelda.

Ultraheli mehaanilise toime aluseks on nn. kavitatsiooninähtus. Helilaine levimisel vedelikus tekivad seal üksteisele järgnevad hõrendused ja tihendused. Kui vedelikku läbib võimas ultrahelilaine, saavad vedelikuosakesed nii suuri kiirendusi, et nad rebitakse üksteise küljest lahti: tekivad nn. kavitatsioonitühikud. Hõrendusele järgneb kohe vedeliku kokkusurumine. Kavitatsioonitühiku sulgumise hetkel tekivad hetkeliselt surved kuni 10^9 N/m² (~ 10 000 at), mis mõjuvad mikroskoopilise vasara löökidena detaili pinnale.

Tööstuses kõige laialdasemalt levinud ultraheliallikaks on magnetostriktsioonvibraator.

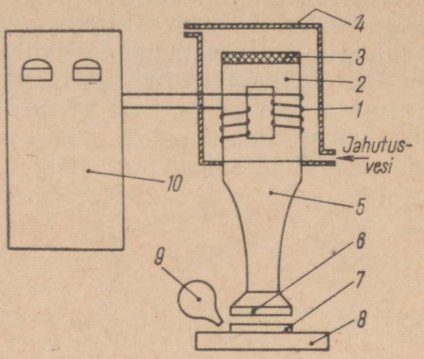
Magnetostriktsiooniefekt seisneb ferromagnetilise keha mõõtmete muutmises temale mõjuva vahelduva magnetvälja toimel. Magnetostriktsiooniefektist tulenevad keha mõõtmete muutused on väga väikesed, ligikaudu 10^{-4}%. Muutuse suurus sõltub keha materjalist.

Magnetostriktsioonvibraatori ehitus sarnaneb mõnevõrra transformaatori ehitusega. Tema südamik koosneb magnetostriktsioonsete omadustega (näit. nikkel) plekkidest, mille ümber on mähitud vasktraadist mähis. Kui lasta mähisest läbi vahelduvasuunalist elektrivoolu, hakkab südamik voolu muutumise taktis võnkuma. Võnkeamplituud on maksimaalne, kui elektrivoolu sagedus on võrdne südamiku omavõnkesagedusega. Südamiku külge kinnitatakse lõikeinstrument.

Magnetostriktsiooniefekti suurendamiseks tekitatakse magnetostriktori südamikus peale vahelduva magnetvälja veel püsiv magnetväli. Viimane saadakse kas spetsiaalse eelmagneetimismähisega või põhiergutusmähisesse alalisvoolu (eelmagneetimisvoolu) juhtimise teel.

Elektrienergia ultraheliks muundamise teiseks levinud meetodiks on piesoelektrilise efekti kasutamine. Saadavad võimsused on väikesed ja neid rakendatakse peamiselt ultrahelidefektoskoopias.

Ultraheli tekitamiseks vajalik kõrgsageduslik elektrivõnkumine saadakse lampgeneraatoritest.



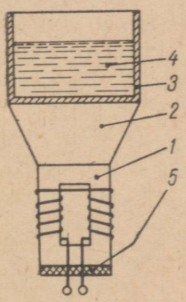
Joon. 61. Ultraheliga lõikamise põhimõtteline skeem:
1 — mähis; *2* — magnetostriktori südamik; *3* — ultraheli peegeldaja (poorse kummi kiht); *4* — jahutussärk; *5* — lainejuht (kontsentraator); *6* — lõikeinstrument; *7* — töödeldav detail; *8* — töölaud; *9* — abrasiivi reservuaar; *10* — ultraheligeneraator

Ultraheliga lõikamine. Ultraheliga lõikamisel on teiste meetodite ees rida eeliseid: on võimalik saada igasuguse kujuga süvendeid ja detaile (ümmargusi, nelinurkseid, hulknurkseid jne.), korraga töödeldakse palju süvendeid või lõigatakse palju detaile.

Ultraheliga lõikamise põhimõtteline skeem on esitatud joonisel 61. Niklist või permalloist südamiku *2* ümber on mähis *1*, mis on ühendatud ultraheligeneraatoriga *10*. Ühepoolse kiirguse saamiseks on südamiku vaba otsa külge kleebitud ultrahelilaineid peegeldav poorse kummi kiht *3*. Kui südamiku mõõtmed valida sellised, et tagasipeegelduv ultrahelilaine ja väljakiirguv laine langevad faasis ühte, siis vibraatori kiirgusvõime suureneb neli korda. Jahutamiseks on vibraator asetatud veesärki *4*. Vibraatori külge on kinnitatud nn. lainejuht e. kontsentraator *5*. Lainejuhi ülesanne on ultrahelilainete edasikandmine lõikeinstrumendile *6*, mis on kinnitatud lainejuhi alumise otsa külge. Töölauale *8* asetatud räni- (või germaanium-) plaadi ja lõikeinstrumendi vahele juhitakse abrasiivsuspensiooni. Ultrahelivõnkumiste mõjul uuristavad abrasiiviterad räniplaati lõikeinstrumendi kujule vastava augu.

Ultraheliga puhastamine. Ultraheliga puhastatakse pooljuhtmaterjalide pinda mitmesugusest mustusest (õlist, rasvadest, abrasiivipurust jne.).

Ultraheli kiirendab mustusekihi lahustumist (kui vedelik on lahustaja), ta mõjub ka puhtmehaaniliselt, lõhkudes mustusekihti kavitatsiooninähtuse tõttu. Eriti efektiivne on ultraheli väikeste



Joon. 62. Ultraheliga puhastamise põhimõtteline skeem:
1 — magnetostriktori südamik; *2* — lainejuht; *3* — vann; *4* — puhastusvedelik (lahustaja); *5* — poorse kummi kiht

keerulise kujuga detailide pesemisel, mida mõnel muul viisil on väga raske või isegi võimatu puhastada. Ultraheliga puhastamise põhimõtteline skeem on toodud joonisel 62.

Ultrahelivõnkumine juhitakse vanni läbi põhja. Lahustajatena kasutatakse tetrakloorsüsinikku, trikloorетüleeni, toluooli, piiritust ja ka vett. Puhastustsükli kestus sõltub mustuse liigist, ultraheli võimsusest ja sagedusest, lahustajast ja temperatuurist. Tavaliselt kestab protsess 10 ... 15 sekundist kuni mõne minutini.

6. MATERJALIDE KEEMILINE TÖÖTLEMINE

6. 1. POOLJUHTMATERJALIDE KEEMILINE TÖÖTLEMINE

Monokristallilise germaaniumi ja räni pinna mehaanilisel töötlemisel (lõikamine, lihvimine) tekivad sagedasti pinnakihis defektid. Vigastatud ja defektiderohke pinnakiht, mis on mõne aatomikihi või veelgi suurema paksusega, võib oluliselt erineda elektriliste omaduste poolest kristalli ülejäänud osast. Vigastatud pinnakiht on tundlikum keemilistele mõjudele kui ülejäänud kristalliosa, mis on täiuslikuma struktuuriga. Seetõttu osutub vajalikuks eemaldada rikutud pinnakiht, mis on tekkinud mehaanilise töötlemise tagajärjel. Defektidega pinnakihti võib eemaldada keemilise söövitamise teel.

S ö ö v i t u s l a h u s e k o o s t i s. Tavaliste söövituslahuste koostises on järgmised komponendid:

1) oksüdeerija;
2) oksiidi lahustaja;
3) reaktsiooni kiirendaja;
4) reaktsiooni aeglustaja.

Pooljuhtmaterjali lahustamise hõlbustamiseks söövituslahuses muudetakse sageli tema pinnakiht eelnevalt oksiidiks. Selleks otstarbeks ongi söövituslahuse koostises oksüdeerija. Oksüdeerijana kasutatakse lämmastikhapet või vesinikperoksiidi. Oksiidi lahustajana on tavaliselt söövituslahuse koostises fluorvesinikhape või leelis (NaOH või KOH). Reaktsiooni kiirendajana kasutatakse broomi. Broomi asemel kasutatakse vahel ka naatriumjodiidi, joodi, hõbenitraati, vasknitraati või naatriumkarbonaati. Reaktsiooni aeglustajana on tuntud äädikhape. Ilma selleta toimuks mõningate söövituslahuste puhul reaktsioon sellise kiirusega, et seda ei oleks võimalik kontrollida.

S ö ö v i t u s t i n g i m u s e d. Keemilise söövitamise kiirus oleneb söövituslahuse koostisest, söövitatavate pindade kristallograafilisest orientatsioonist (vt. ptk. 1) ja pooljuhi lisandite kontsentratsioonist. Mehaaniliselt töödeldud pinnad söövituvad tavaliselt kiiremini kui eelnevalt juba keemiliselt söövitatud pinnad. Pooljuhtmaterjal, mille lisandite kontsentratsioon on suurem, söövitub kiiremini.

Et pooljuhtmaterjali söövitamisel saada ühesuguseid, korduvaid tulemusi, peab lisaks pinna orientatsioonile olema täidetud veel rida teisi tingimusi. Pooljuhi pind peab olema ühtlase mehaanilise töötlusega, s. t. ühesuguse pinnareljeefiga. Samuti tuleb kasutada ühesugust lahuse mahtu, töödeldava pinna suurust ja lahuse temperatuuri. Täites neid tingimusi, saame korraliku *p-n*-siirde ja vähendame elektriliste parameetrite praaki. Temperatuuri tõus, lahuse mitteküllaldane segamine, samuti lahuse koostise muutumine keemilise reaktsiooni tagajärjel muudavad söövituse kiirust.

Söövituslahus ei tohi eraldada palju gaase. Gaasi ioonid adsorbeeruksid pooljuhtmaterjali pinnale ja tekitaksid seega lisandjuhtivuse, mis omakorda muudaks elektrilisi parameetreid. Ka ei tohi söövituslahus moodustada pooljuhtmaterjaliga tahket sadet, mis kleepuks söövitatavale pinnale ja mida oleks sealt raske eemaldada.

Keemilised reaktsioonid germaaniumi ja räni söövitamisel. Eelkõige vaatleme keemilisi protsesse, mis tekivad germaaniumi söövitamisel.

Söövitamisel vesinikperoksiidiga laguneb viimane hapnikuks ja veeks. Eralduv hapnik osutub heaks germaaniumi oksüdeerijaks.

$$H_2O_2 \xrightarrow{\text{soojendamine}} H_2O + 0.$$
$$Ge + O = GeO.$$

GeO on väga ebapüsiv ühend, mis oksüdeerub edasi germaaniumdioksiidiks:

$$GeO + O = GeO_2.$$

GeO_2 on vees lahustuv ja reageerib veega järgmiselt:

$$GeO_2 + H_2O = H_2GeO_3.$$

Tavaliselt toimub reaktsioon vesinikperoksiidiga aeglaselt. Seetõttu lisatakse vesinikperoksiidile mitmesuguseid kiirendajaid, nagu soolhapet (HCl) või väikestes hulkades naatriumhüdroksiidi (NaOH).

Söövitamisel hapetega kasutatakse hapniku allikana lämmastikhapet:

$$Ge + 2HNO_3 = GeO + 2NO_2 + H_2O$$
$$GeO + 2HNO_3 = GeO_2 + 2NO_2 + H_2O.$$

Oksiidi lahustina kasutatakse fluorvesinikhapet:

$$GeO_2 + 4HF = GeF_4 + 2H_2O.$$

Räni söövitatakse lämmastik- ja fluorvesinikhappe segus. Söövitamine vesinikperoksiidis ei anna tulemusi, kuna räni pinnale

moodustub oksiidikiht, mis ei lahustu enam ei vesinikperoksiidis ega vees. Söövitamine hapetega toimub järgmiselt:

$$Si + 2HNO_3 = SiO_2 + NO_2 + NO + H_2O.$$

Ränidioksiidi lahustamiseks kasutatakse fluorvesinikhapet:

$$SiO_2 + 4HF = SiF_4 + 2H_2O.$$

Räni söövitamiseks kasutatakse veel 30%-list leelist, millega kulgeb reaktsioon järgmiselt:

$$Si + 2KOH + H_2O = K_2SiO_3 + 2H_2.$$

Moodustunud ränihappesool hüdrolüüsub:

$$K_2SiO_3 + 2H_2O = H_2SiO_3 + 2KOH.$$

Hüdrolüüsi tulemusena tekkinud leelis reageerib uute räniportsjonitega.

Mõningaid söövituslahuseid.

Toodud retseptid on komponentide järgmiste kontsentratsioonide jaoks:

HF — 49%
HNO_3 — 70%
H_2O_2 — 30%
HCl — 36%
CH_3COOH — kristalliline.

1. Vesinikperoksiid-söövituslahus

1 osa H_2O_2
1 osa HF
4 osa H_2O.

Kasutatakse germaaniumi tasapinna (100) söövitamiseks.

2. CP-4

25 osa HNO_3
15 osa HF
15 osa CH_3COOH
0,3 osa Br_2.

Kasutatakse nii germaaniumi kui ka räni söövitamiseks. Söövitab ühtlaselt kõiki kristallograafilisi tasapindu.

3. CP-8

2 osa HNO_3 (98%)
1 osa HF.

Kasutatakse nii germaaniumi kui ka räni söövitamiseks.

4. CP-4A — koostiselt sama mis CP-4, kuid ilma broomita.

Kõige sagedamini kasutatakse räni söövitamiseks lahust CP-8. Kasutatakse ka teisi HF ja HNO_3 hapete vahekordi. Söövituse kiirus ja kvaliteet oleneb tunduvalt hapete vahekorrast söövi-

tuslahuses. Mõnikord lisatakse söövituslahusele mõningal määral äädikhapet, mis aeglustab reaktsiooni, või broomi reaktsiooni kiirendamiseks.

Plaatide ja kristallide söövitamine. Söövituslahuste valmistamisel plaatide ja kristallide söövitamiseks peab arvestama, et söövitamine hapete segus võib toimuda ainult fluoroplastist anumates. Sinna mõõdetakse vajalikud kogused happeid, mida segatakse ettevaatlikult fuoroplastist pulgaga. Lahus peab enne söövitamist seisma ettenähtud temperatuuril 0,5 ... 1 tund. Söövitamisel vesinikperoksiidi ja leelistega võib kasutada kvartsnõusid.

Söövituslahuste valmistamisel kasutatakse kõrge puhtusastmega happeid.

Plaatide ja kristallide söövitamine hapete segus toimub vastava söövitusabinõuga, mis on valmistatud fuoroplastist või polüetüleenist. Koos abinõuga asetatakse plaadid ja kristallid söövituslahusesse.

Söövitusaeg söövituslahuses oleneb söövitatava pinna suurusest ja *p-n*-siirde struktuurist. Söövitusprotsessi kestel liigutatakse detaili. Liigutada tuleb ettevaatlikult, et vältida söövituslahuse pritsimist ja pritsmete sattumist nahale või riietele. Detaili liigutamisega toimub ka söövituslahuse segamine, mis mõjub positiivselt söövitatava pinna kvaliteedile. Söövituse lõpetamiseks katkestatakse reaktsioon külma deioniseeritud vee lisamisega, mis järsult muudab hapete kontsentratsiooni söövituslahuses. Sageli tõstetakse ka abinõu kiiresti koos detailidega teise nõusse, mis on täidetud deioniseeritud veega.

Pooljuhtmaterjalide söövitamisel hapetes eraldub soojust. Plaatide või kristallide väljatõstmisel söövituslahusest jääb nende pinnale hapet, mis tormiliselt reageerib pooljuhtmaterjalidega. See kutsub esile plaadi või kristalli lokaalse soojenemise ja ülesöövituse, kusjuures eraldub tugevasti NO_2. NO_2 toimel võib tekkida plaadi pinnale uuesti oksiidikiht. Selline oksiidikihi tekkimine on eriti sagedane räni söövitamisel, mistõttu on otstarbekas reaktsioon katkestada rohke deioniseeritud vee lisamisega söövituslahusele.

Pärast söövitust pestakse plaadid ja kristallid hoolikalt deioniseeritud veega ja kuivatatakse.

Söövituse kiirus ja kvaliteet oleneb lahuse temperatuurist ja hapete kontsentratsioonist, samuti söövituslahuse hulgast söövitatavale pinnale. Mida enam on söövituslahuses fluorvesinikhapet, seda kiiremini toimub reaktsioon ja seda suurem on soojuse eraldumine, mis kiirendab reaktsiooni. Ka intensiivistub söövitumine hapete kontsentratsiooni tõstmisel.

6.2. METALLIDE GALVAANILINE KATMINE

Tänapäeval pole sellist pooljuhttoodet, mille valmistamisel ei oleks vaja kasutada pindade galvaanilist katmist.

Metalli pind kaetakse mõne teise metalli õhukese kilega, et kaitsta põhimaterjali väliskeskkonna mõjude eest, kergendada detailide tinutamist, muuta väline pind siledaks, ühtlaseks ja läikivaks ning anda tootele meeldiv välimus.

Üldteadmisi elektrokeemiast. Galvanotehnikas kasutatakse laialdaselt hapete, aluste ja soolade vesilahuseid.

Kindlas koguses vees või lahuses sisalduva aine hulka nimetatakse tema kontsentratsiooniks. Väga tihti puututakse galvanotehnikas kokku mahulise kontsentratsiooniga — see on ühes liitris lahuses sisalduva aine kaal grammides (g/l).

Lahust, mis sisaldab maksimaalse hulga antud ainet (antud temperatuuril), nimetatakse küllastatud lahuseks.

Lahust, mille 1 liitris sisalduva aine hulk võrdub tema ekvivalentkaaluga, nimetatakse normaalseks lahuseks. Lahustudes lagunevad hapete, aluste ja soolade molekulid positiivselt ning negatiivselt laetud ioonideks; seda protsessi nimetatakse elektrolüütiliseks dissotsiatsiooniks.

Elektrolüüdis on laengukandjateks ioonid, mis liiguvad välise elektrivälja mõjul. Ioone, mis liiguvad negatiivselt laetud elektroodile (katoodile), nimetatakse katioonideks, aga neid, mis liiguvad positiivselt laetud elektroodile (anoodile), anioonideks.

Voolu toimel elektrolüüdi koostis muutub, sest vesinik ja metallid sadestuvad katoodile, aga kõik mittemetallid ja happejäägid sadestuvad anoodile. Pärast nende laengute neutraliseerimist katoodil või anoodil gaasilised elemendid lenduvad, tahked aga jäävad elektroodide pinnale. Elektrolüüdi lagunemist elektrivoolu toimel nimetatakse elektrolüüsiks.

Olgu meil elektrolüüdiks keedusoola (NaCl) vesilahus. Positiivselt laetud naatriumioonid Na^+ eralduvad katoodil, anoodile suunduvad aga negatiivselt laetud kloorioonid Cl^-, mis pärast neutraliseerumist reageerivad veega ja moodustavad soolhappe (HCl). Protsessi kvantitatiivset külge iseloomustavad Faraday seadused.

1. Elektrolüüsil eralduva aine hulk on võrdeline voolu tugevuse ja elektrolüüsi ajaga.

2. Sama elektrivooluhulga läbilaskmisel erinevatest elektrolüütidest on elektrolüüsil eraldunud aine hulk seda suurem, mida suurem on aine keemiline ekvivalent (aine keemiline ekvivalent võrdub aatomkaalu ja valentsi jagatisega).

Siit nähtub, et elektrolüüsil eraldunud aine hulk on võrdeline voolu tugevuse ja elektrolüüsi aja korrutisega. Tihti kasutatakse elektrolüüsi iseloomustamiseks suurust *elektrokeemiline ekvivalent.*

Tabel 2

Elementide elektrokeemiline rida

Element	Ioonid lahuses	Elektroodi potentsiaal	Element	Ioonid lahuses	Elektroodi potentsiaal
Kaalium	K^+	—2,92	Tina	Sn^{++}	—0,14
Naatrium	Na^+	—2,71	Plii	Pb^{++}	—0,13
Magneesium	Mg^{++}	—1,66	Vesinik	H^+	±0,00
Alumiinium	Al^{+++}	—2,67	Antimon	Sb^{+++}	+0,20
Tsink	Zn^{++}	—0,76	Arseen	As^{+++}	+0,30
Kroom	Cr^{+++}	—0,55	Vask	Cu^{++}	+0,34
Raud	Fe^{+++}	—0,44	Hõbe	Ag^+	+0,81
Kaadmium	Cd^{++}	—0,40	Elavhõbe	Hg^{++}	+0,86
Koobalt	Co^{++}	—0,27	Kuld	Au^{++}	+1,68
Nikkel	Ni^{++}	—0,25			

Elektrokeemiliseks ekvivalendiks nimetatakse aine hulka grammides, mis sadestub elektroodil ühe tunni jooksul üheamprise voolutugevuse juures.

Voolu tugevust elektroodi ühe pinnaühiku kohta nimetatakse tiheduseks ja seda mõõdetakse amprites ruutdetsimeetri kohta (A/dm^2).

Metalli asetamisel elektrolüüti tekib metalli ja elektrolüüdi vahel potentsiaalide vahe, mida nimetatakse elektroodipotentsiaaliks ja mõõdetakse voltides.

Asetades metallid nende elektroodipotentsiaali suuruse järgi ritta, saame rea, mida nimetatakse elektrokeemiliste pingete reaks (tabel 2). Sellest reast on näha, milline peab olema väikseim pinge, et lahusest eralduks katoodile see või teine metall.

Enne metallide galvaanilist katmist tuleb nende pinnad hoolikalt puhastada igasugustest rasvadest ja oksiidist.

Olenevalt sellest, mis liiki rasvadega on antud metalli pind kaetud, kasutatakse selle eemaldamiseks erinevaid viise.

1. Lahustamine (eelnev puhastamine, s. o. mineraalsete õlide ja poleerimispasta mahapesemine enne keemilist ja elektrolüütilist puhastamist).

2. Keemiline puhastamine leelise lahuses (pindade puhastamine taimsetest ja loomsetest rasvadest).

3. Elektrokeemiline puhastamine (tavaliselt väikeste ja lihtsa kujuga vähesaastunud detailide puhastamine).

Orgaaniliste lahustite hulka kuuluvad bensiin, petrooleum, bensool, trikloorетüleen, diklooretaan, atsetoon ja tetrakloorsüsinik. Lahustumise kiirendamiseks on soovitatav vanni veidi soojendada või kasutada ultraheli.

Keemiline puhastamine leeliste lahuses põhineb sellel, et taimsed ja loomsed rasvad lagunevad kuuma leelise toimel ja moodus-

tavad seebi, mida on kuuma veega kerge maha pesta. Mineraalsed rasvad moodustavad leelise toimel emulsiooni. Selle protsessi puhul eemalduvad rasvaosakesed detaili pinnalt ja jäävad lahusesse hõljuma.

Elektrokeemiliseks töötlemiseks riputatakse detailid leeliselise elektrolüüdiga vanni katoodi külge. Voolu läbilaskmisel tekkivad vesinikumullikesed kisuvad detaili pinnalt rasvakihi maha.

Pärast rasvakihi hoolikat eemaldamist söövitatakse detaile lahjendatud happes või hapete segus. Söövitamisega eemaldatakse detaili pinnalt oksiidikiht ja õhuke kiht metalli. See soodustab kattematerjali ühinemist põhimaterjaliga.

Metallide elektrolüütilise katmise meetodid. Pooljuhtide tööstuses kasutatakse peamiselt tinatamist, vasetamist, nikeldamist, hõbetamist ja kuldamist.

Pinda võib ühe või teise metalliga katta väga erineva koostisega elektrolüütides. Järgnevalt vaatleme ainult metallide elektrokeemilise sadestamise meetodeid, mis annavad kõige paremaid tulemusi.

Tinatamine on põhimetalli katmine tinakihiga.

Tinaga katmine on eriti laialdaselt levinud tina suure keemilise püsivuse ja madala sulamistemperatuuri tõttu. Tinaga kaetakse detailid ja sõlmed, mis hiljem kuuluvad tinutamisele. Tinakiht kaitseb metalli pinda korrosiooni eest. Ta on kaitseks lahjendatud mineraalsete hapete ja paljude orgaaniliste hapete eest, samuti õhu ja niiskuse eest. Kangetes kuumutatud sööbeleelistelahustes tina lahustub.

Tina võib sadestada happelistest ja leeliselistest elektrolüütidest. Happelistest elekrolüütidest sadestub tina kaks korda kiiremini kui leeliselistest elektrolüütidest. Tinaga katmist happelistest elektrolüütidest eelistatakse siledate pindade ja traadi tinatamisel. Kui tahetakse saada keerulise kujuga detailidele peene struktuuriga tinakihti, siis sadestatakse leeliselisest elektrolüüdist. Seepärast tinatatakse pooljuhtide tööstuses enamasti leeliselisest elektrolüüdist. Seejuures on elektrolüüdi koostis järgmine (g/l): 60 ... 90 osa tinakloriidi, 10 osa sööbenaatriumi, 15 ... 20 osa äädikhappenaatriumi, 2 osa vesinikperoksiidi.

Voolutihedus $D_k = 1{,}5 \ldots 2$ A/dm^2; temperatuur 65 ... 75° C; pinge vannis 3,5 ... 4,4 V.

Leeliseliste elektrolüütidega töötamisel tuleb erilist tähelepanu pöörata leelisesisaldusele lahuses. Leelise üleküllus põhjustab urbset sadestumist. Vähene leelisesisaldus põhjustab nõrgalt kinnitatud kihi sadestamist.

Nikeldamist kasutatakse põhimetalli kaitsmiseks oksüdeerumise ja korrosiooni eest, aga ka detailile nägusa välimuse andmiseks.

Nikkel on hõbevalge metall, küllalt kõva, vastupidav atmos-

fääri mõjudele ning leelistele ja mõningatele hapetele. Nikeldamisel saadakse tavaliselt peene struktuuriga tihe kiht.

Pooljuhtide tööstuses nikeldatakse tavaliselt kübaraid ja kristallihoidjaid, mis pärast lähevad külmkeevitusele.

Nikeldamisel on soovitatav kasutada happelisi elektrolüüte. Statsionaarses nikkelanoodiga vannis soovitatakse kasutada järgmise koostisega elektrolüüti (g/l) : 140 ... 200 osa nikkelsulfaati, 40 ... 60 osa naatriumsulfaati, 20 ... 30 osa mangaansulfaati, 25 ... 30 osa boorhapet, 5 ... 7 osa naatriumkloriidi või kaaliumkloriidi. Voolutihedus $D_k = 0{,}5 \ldots 1$ A/dm² 18 ... 20° C juures või $D_k = 1{,}2 \ldots 1{,}5$ A/dm² 30 ... 35° C juures; kui kasutada elektrolüüdisegajat, võib voolutihedus olla kuni 2,5 A/dm².

Nikeldamiselektrolüüdis on peamiseks soolaks nikkelsulfaat. Elektrolüüdi elektrijuhtivuse tõstmiseks kasutatakse naatriumsulfaati. Mangaansulfaat tõstab lahuse katmisomadusi ja annab sadestatud kihile valge värvuse ning teeb ta pehmemaks. Boorhape annab elektrolüüdile happesuse.

Hõbetamist kasutatakse põhimetalli kaitsmiseks väliskeskkonna mõjude eest, elektrijuhtivuse tõstmiseks, ilma flussita tinutamise võimaluse loomiseks ja ka dekoratiivsetel eesmärkidel.

Hõbe on valge pehme metall, mis paistab silma oma keemilise püsivuse ja väga hea elektrijuhtivuse poolest. Hõbe peaaegu ei reageeri leelistega, sool- ja väävelhappega, ainult lämmastikhape lahustab teda nõrgalt. Ta ei oksüdeeru õhu käes, mis võimaldab hõbetatud detaile ilma flussita tinutada.

Niklist või terasest detailide hõbetamisel (ilma vasest kattekihita) sadestatakse järjestikku kahest elektrolüüdist.

Eelnev hõbetamine: 2 ... 5 g/l hõbekloriidi ja 8 ... 100 g/l tsüaankaaliumi. Voolutihedus $D_k = 1{,}5 \ldots 2$ A/dm² 18 ... 25° C juures.

Lõplik hõbetamine: 27 g/l kloorhõbedat ja 48 g/l tsüaankaaliumi. Voolutihedus $D_k = 0{,}3$ A/dm² 18 ... 20° C juures ja vanni pingel 2 ... 2,5 V.

Anoodid peavad olema valmistatud puhtast hõbedast.

Hõbetamist teostatakse tavaliselt koputusvannides või pöörleva katoodiga vannides. Hõbetamist saab kiirendada pinge perioodilise tõstmisega (iga 2,2 s järel), mis võimaldab tõsta voolutihedust kuni 4 A/dm², kusjuures hõbetamise kvaliteet paraneb, kate muutub tihedaks ja pind peaaegu läikivaks.

Kuldamine. Kuldamise peamiseks eesmärgiks on samuti kaitsmine atmosfääri mõjude eest, elektriliste omaduste parandamine, ilma flussita tinutamise võimaluse loomine ja dekoratiivsete omaduste tõstmine. Pooljuhtide tööstuses kullatakse kristallihoidjaid ja kübaraid külmkeevituseks või flussita tinutamiseks ja juhtmeid ning pooljuhtplaate.

Kuld on täiesti kindel igasuguste leeliste ja hapete vastu. Ta

lahustub ainult kange lämmastiku ja soolhappe segus, nn. kuningvees. Õhu käes kuld ei tuhmu isegi mitte karastamisel. Nende omaduste tõttu kasutataksegi kulda laialdaselt pooljuhtide töötuses.

Kuldamisel kasutatakse kollast veresoola sisaldavaid elektrolüüte. Elektrolüüdi peamiseks koostisosaks on kulla soolad.

Et saada rahuldavat katet, peab elektrolüüdis olema kulda 4 ... 5 g ja tsüaankaaliumi 15 ... 20 g/l.

Voolutihedus $D_k = 0{,}1$ A/dm^2 või 0,3 ... 0,4 A/dm^2 temperatuuril 18 ... 20° C. Viimasel juhul tuleb sadestatud kiht palju ühtlasem.

Kui elektrolüüdile lisada naatriumfosfaati, siis elektrolüüdi juhtivus suureneb ja voolutihedust võib veidi tõsta.

7. *p-n*-SIIRETE VALMISTAMISE VIISE

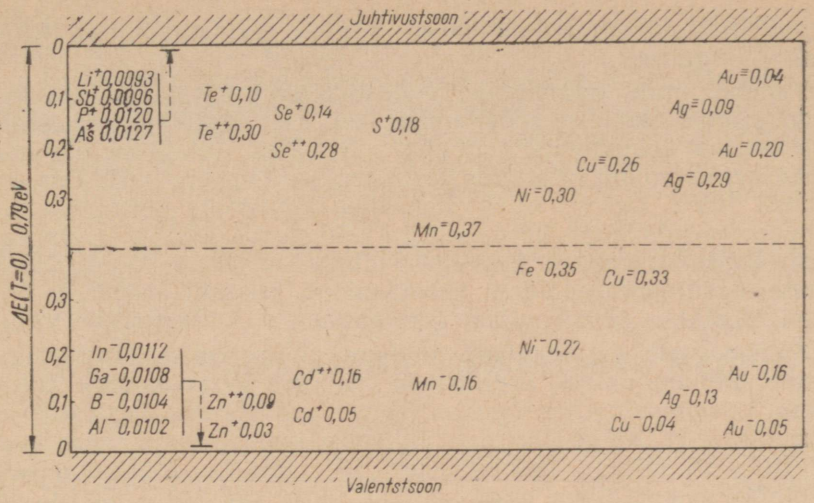
Tehnika järjest kasvavad vajadused pooljuhttoodete järele on viimasel ajal koondanud tähelepanu lisandite pooljuhtmaterjalidesse difundeerumise protsesside uurimisele. See on tingitud sellest, et kogu pooljuhtventiilide, võimendus- ja fotoelementide valmistamise tehnoloogia põhineb difusiooniprotsessidel pooljuhtides.

Difusiooniprotsessidega on seotud ka sellised nähtused nagu pooljuhttoodete vananemine, pooljuhtmaterjalide puhastamine ja homogeniseerimine, pooljuhtkilede kasvatamine metallidele, mida kuumutatakse mõnede elementide gaasilises keskkonnas, ja paljud teised nähtused.

Uurimistööde esimesel etapil oli põhiline tähelepanu pööratud nende elementide difusiooniteguri määramisele, mis kõige teravamalt muudavad pooljuhi elektrilisi omadusi ja viivad *p-n*-siirete tekkimisele. Sellisteks lisanditeks on Mendelejevi perioodilisussüsteemi III ja V rühma elemendid, mis moodustavad germaaniumi ja räniga tahked asenduslahused. Nende aatomid on elektriliselt aktiivseteks tsentriteks, mille lokaalsed energianivood asuvad germaaniumi ja räni lubatud energiatsoonide lähedal. Energianivoode selline asetus annab võimaluse lisandite väga kergeks ioniseerimiseks, mistõttu lisandjuhtivus domineerib väga laias temperatuurivahemikus. Lisandite sisseviimisega on võimalik germaaniumi juhtivust muuta väga laias diapasoonis. Seejuures on V rühma elemendid doonoriteks ja III rühma elemendid aktseptoriteks.

Vase, kulla, hõbeda, tsingi, nikli ja raua germaaniumisse difundeerumise uurimisele olid suunatud edasised tööd. Need elemendid moodustavad germaaniumiga samuti tahkeid asenduslahuseid, kuid annavad sügaval keelutsooni sees asuvad aktseptorite nivood. Loetletud elemendid annavad juba 2 kuni 3 energianivood sõltuvalt puuduvate valentselektronide arvust, mis on vajalikud kovalentse sideme jaoks germaaniumi kristallivõres. Kullal on peale kolme aktseptornivoo avastatud veel üks doonornivoo. Need sügaval asuvad nivood, etendades laengukandjate rekombinatsioonitsentrite osa, lühendavad vähemus-laengukandjate eluiga ja kiirendavad rekombinatsiooniprotsessi pooljuhttoodetes.

Joonisel 63 on toodud mõningate elementide energianivoode



Joon. 63. Lisandite energianivoode paigutus Ge-ni keelutsoonis

paigutus germaaniumi keelutsoonis. Energianivood on antud valentstsooni «lae» või juhtivustsooni «põhja» suhtes.

Teiste elementide, nagu vesiniku, hapniku, seleeni, telluuri, samuti tina ja plii difusiooni on praegu veel väga vähe uuritud. Vesiniku ja hapniku elektrilise aktiivsuse uurimine on näidanud, et nemad ei anna germaaniumis laengukandjaid ja on tõenäoliselt omavahel seotud. G. Elliotti andmetel esineb doonorina ainult osa hapnikust, mis ei ole seotud vesinikuga. Ka telluur ja seleen on doonori omadustega. Tina ja plii on väga väikese elektrilise aktiivsusega lisandid germaaniumis. Arvatakse, et nad moodustavad väga sügaval asuvad doonornivood.

7. 1. SULANDAMISMEETOD

n-tüüpi juhtivusega germaaniumis või ränis saame *p*-*n*-siirde ainult siis, kui aines, mida me antud pooljuhti sulandame, on üheks komponendiks Mendelejevi perioodilisussüsteemi III rühma element.

Pärast sulandamist tungivad sulandi kristalliseerumisel lisandi aatomid pooljuhi kristallivõresse ja tekitavad sulandi ja kristalli kokkupuutepiirkonnas *p*-tüüpi juhtivuse. *n*-tüüpi juhtivusega põhimaterjali ja tekkinud *p*-tüüpi juhtivusega ala kokkupuutepinnal moodustub *p*-*n*-siire.

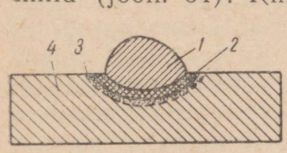
p-*n*-siirde saamiseks *p*-tüüpi pooljuhis kasutatakse elemente perioodilisuse süsteemi V rühmast.

p-n-siire indiumi sulandamisel *n*-tüüpi germaaniumisse tekitatakse järgmiselt.

Vahetult enne sulandamist puhastatakse germaaniumi ja indiumi pinnad oksiidist söövitamise teel, sest oksiidikiht takistab germaaniumi lahustumist indiumis. Seejärel asetatakse indiumi tükike germaaniumi kristallile ja tõstetakse temperatuuri. Temperatuuril 155° C indium sulab ja hakkab lahustama germaaniumi. Temperatuuri tõusuga germaaniumi lahustuvus kasvab. Germaaniumi kontsentratsiooni kasvuga indiumis väheneb vedela faasi frondi edasitungimise kiirus germaaniumi kristalli sisemusse indiumi tilgakese järkjärgulise germaaniumist küllastumise tõttu.

Samaaegselt germaaniumi indiumis lahustumise protsessiga toimub indiumi aatomite difusioon tahkesse germaaniumi. Difusiooni ja sissesulamise sügavus oleneb sulandamise kestusest ja temperatuurist. Kõige paremaid tulemusi annab sulandamise kestus 10...15 minutit, minimaalselt 10 minutit. Maksimaalselt kasutatav temperatuur germaaniumi jaoks on 500...700° C ja räni jaoks 900...1200° C. Temperatuuri kõikumine mõjub sulandamise kvaliteedile halvasti.

Järgneval jahutamisel hakkab sulanud germaanium uuesti kristalliseeruma, kusjuures rekristallisatsioonitsooni satub ka tunduv osa indiumi aatomeid. Rekristallisatsioon algab tahke ja vedela faasi piirilt. Kuna aga indium on germaaniumis aktseptorlisandiks, siis kogu germaaniumi rekristallisatsioonikiht omandab *p*-tüüpi juhtivuse. Pärast jahtumist tekivad erinevate omadustega kihid (joon. 64). Kiht *1* on metalliliste omadustega indiumi tilgake, milles on lahustunud germaaniumi; *2* — rekristalliseerunud germaanium indiumilisandiga, mis on *p*-tüüpi juhtivusega; *3* — germaaniumi kristalli osa, millesse sulandamisel difundeerusid indiumi aatomid; *4* — *n*-tüüpi juhtivusega germaaniumikristall.



Joon. 64. Erineva juhtivustüübiga tsoonide tekkimine

Kogu sulandamisprotsess tuleb läbi viia vaakuumis või mingi inertgaasi keskkonnas, et vältida pooljuhtkristalli ja sulandatava aine pindade oksüdeerumist õhuhapniku toimel. Varem sulandati eranditult vaakuumis, kuid viimasel ajal on hakatud kasutama selleks inertgaaside keskkonda, kuna see lihtsustab tunduvalt tehnoloogilisi seadmeid.

p-n-siire tekib seal, kus doonor- ja aktseptorlisandite kontsentratsioonid on võrdsed. Kuna difundeerunud kiht on väga õhuke, on tõenäoline, et *p-n*-siire on tekkinud algse *n*-tüüpi germaaniumi ja *p*-tüüpi rekristalliseerunud kihi lahutuspinnal. Aktseptorlisandi küllalt suure kontsentratsiooni tõttu on rekristalliseerumisel tekkinud *p*-tüüpi juhtivusega ala eritakistus sadu kordi väiksem (suurus-

järgus $1 \cdot 10^{-3} \ldots 5 \cdot 10^{-3}$ Ω cm) kui algselt võetud germaaniumi eritakistus (1 ... 10 Ω cm).

Kirjeldatud meetodit kasutatakse laialdaselt *p-n*-siirde saamiseks nii germaaniumi kui ka räni puhul.

Raskuseks antud meetodi juures on asjaolu, et pooljuhtkristall ja sulandatav metall ei ole samasuguste paisumisteguritega ning suure pindalaga *p-n*-siirde valmistamisel tekivad nende kokkupuutepindadel mõrad, mis tihti põhjustavad kristallide purunemist. Kuid eriliste tehnoloogiliste võtetega on võimalik seda puudust kõrvaldada.

7.2. MONOKRISTALLIDE KASVATAMISE MEETOD

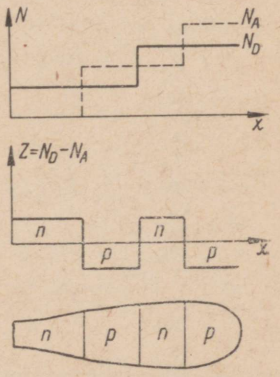
p-n-siirete ja ka keerukamate *n-p-n-p*-struktuuride saamiseks kasutatakse monokristallide kasvatamisel tihti mitmekordset legeerimist, seda nii germaaniumi kui ka räni puhul. Monokristalli kasvatamist alustatakse tavaliselt *n*-tüüpi sulandist ja teatud momendil lisatakse sulandisse tablett vajalike aktseptorlisanditega. Lisandite hulk peab olema selline, et need kompenseeriksid antud momendil sulandis juba olemasolevad doonorlisandid ja tekitaksid vajaliku eritakistusega *p*-tüüpi juhtivuse. Viies sulandisse vastavalt aktseptor- ja doonorlisandeid kolm korda, saame *n-p-n-p*-struktuuriga monokristalli (joon. 65).

Sulandisse viidavate lisandite vajalik hulk algul arvutatakse ja pärast täpsustatakse katsete põhjal.

Sellel meetodil on kerge saada *n-p-n*-tüüpi transistori *p*-tüüpi baasiala paksusega 10 ... 25 μm. *p*-tüüpi ala paksus sõltub põhiliselt monokristalli kasvatamise kiirusest sellel momendil, kui sulandis on aktseptorlisandite ülekaal. Režiimide hoolika valiku korral on võimalik saada baasiala paksuseks 5 ... 7 μm.

Kuna antud meetodil valmistatud transistore on võimalik saada väga õhukese baasialaga, siis on nende töösagedus ka küllalt kõrge — 30 ... 50 MHz. Samuti saab sel meetodil valmistada küllalt suure pindalaga *p-n*-siirdeid, mistõttu saadud transistoridel on suur võimsus ja seejuures väike kollektorsiirde vastuvool.

Vaadeldud meetodi põhiliseks puuduseks on lähtematerjali kulu. Ühest sulan-



Joon. 65. *n-p-n-p*-struktuuriga monokristalli saamine:

x — kaugus valandi algusest; N_A ja N_D — vastavalt aktseptor- ja doonorlisandite kontsentratsioonid. $Z = N_D - N_A$ — doonor- ja aktseptorlisandite kontsentratsioonide vahe, mis määrab juhtivuse tüübi

dist saab kasvatada *n-p-n*-struktuure ainult üks kord (200 . . . 300 tk. korraga), sest igakordse lisandite lisamisega väheneb sulami eritakistus. Teistkordseks kasutamiseks tuleb sulam lisanditest puhastada. Oluliseks raskuseks on veel asjaolu, et ei ole võimalik valmistada mitut partiid ühesuguste parameetritega *p-n*-siirdeid.

Monokristallide kasvatamise juures on võimalik saada *p-n*-siirdeid veel paljudel meetoditel, kuid kõik need põhinevad kas lisandite täiendaval sisseviimisel või lisandite ümberjaotumisel. Näiteks monokristalli erinevatel pöörlemiskiirustel kristalliseeruvad aktseptor- ja doonorlisandid erinevalt. Seega on pöörlemiskiiruse muutmisega võimalik saada erinevat tüüpi juhtivust.

7.3. DIFUNDEERIMISMEETOD

Tänapäeval kasutatakse *p-n*-siirete saamiseks kõige enam difundeerimismeetodit. Eriti asendamatu on ta suure võimsusega dioodide valmistamisel, sest difundeerimismeetodil on võimalik saada kvaliteetseid *p-n*-siirdeid küllalt suurtele pindaladele, mis sulandamismeetodil on väga raske ja kulukas.

Vaatleme lisandi aatomite difundeerumist pooljuhtkristalli.

Olgu pooljuhi pinnal lisandi kontsentratsioon C_1 ja sügavusel Δx pooljuhi sees C_2, kusjuures $C_1 > C_2$ (joon. 66). Kontsentrat-

Tabel 3

Lisandite difusioonitegurid Ge-sse 800° C juures

Element	Perioodilisuse süsteemi rühm	D cm²/s	Elektriline aktiivsus
Li	I	$8{,}6 \cdot 10^{-6}$	Doonor
Cu	I	$2{,}8 \cdot 10^{-5}$	Aktseptor
Ag	I	$8{,}8 \cdot 10^{-7}$	Aktseptor
Au	I	$5 \cdot 10^{-10}$	Aktseptor
Zn	II	$1 \cdot 10^{-12}$	Aktseptor
B	III	$4 \cdot 10^{-13}$	Aktseptor
Ga	III	$1 \cdot 10^{-13}$	Aktseptor
In	III	$2 \cdot 10^{-13}$	Aktseptor
Ge	IV	$8 \cdot 10^{-14}$	—
Sn	IV	$3{,}3 \cdot 10^{-11}$	Doonor
Pb	IV	$2 \cdot 10^{-14}$	Doonor
P	V	$6{,}5 \cdot 10^{-12}$	Doonor
As	V	$4 \cdot 10^{-11}$	Doonor
Sb	V	$2 \cdot 10^{-11}$	Doonor
Fe	VIII	$1{,}6 \cdot 10^{-6}$	Aktseptor
Ni	VIII	$4{,}4 \cdot 10^{-5}$	Aktseptor

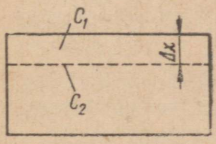
sioonide erinevuse tõttu hakkavad lisandi aatomid tungima pooljuhtkristalli sisse. Difusiooni kiirus antud materjalisse sõltub temperatuurist ja lisandi liigist. Lisandi difundeerumise kiirust materjalisse iseloomustatakse difusiooniteguriga D cm²/s. Temperatuuri tõustes kasvab difusiooni kiirus järsult. Doonorlisandid (välja arvatud fosfor) difundeeruvad germaaniumisse kiiremini kui aktseptorlisandid. Räni puhul on olukord vastupidine.

Tabelis 3 on toodud mõningate elementide difusiooniteguri germaaniumi puhul temperatuuril 800° C.

III ja V rühma elementide iseloomustavaks jooneks on väike difusioonikiirus. Teisest küljest aga moodustavad nende rühmade elemendid väga laias temperatuurivahemikus germaaniumiga nn. tahked asenduslahused, s. o. lisandi aatomid asendavad germaaniumis lahustudes viimase aatomeid kristallivõres. Seepärast võib eeldada, et III ja V rühma elementide difundeerumine germaaniumisse toimub nende liikumisega kristallivõre vakantseid kohti mööda ja regulaarsete germaaniumaatomitega kohtade vahetamise teel.

Valides sobiva lisandi, saame difusiooni teel pooljuhi pinnale kihi, mis on vastupidise juhtivustüübiga. Teatud sügavusel, kus difundeerunud lisandi kontsentratsioon on võrdne lähtepooljuhi lisandi kontsentratsiooniga, tekib p-n-siire.

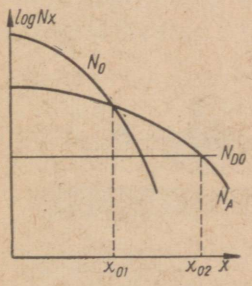
Mitme p-n-siirdega struktuuri saamiseks difundeeritakse pooljuhti üheaegselt või järjestikku mitut lisandit. Seejuures arvestatakse, et need lisandid omavahel ei ühineks ja nende difusioon toimuks teineteisest sõltumatult. Üheaegse difusiooni jaoks vali-

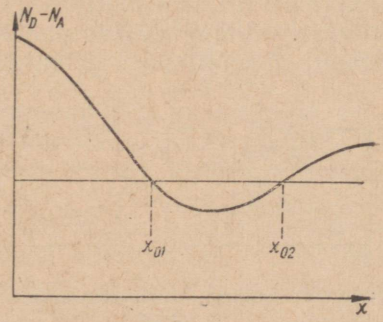


Joon. 66. Pooljuhtkristall:
C_1 — lisandi kontsentratsioon pinnal; C_2 — lisandi kontsentratsioon sügavusel Δx

Joon. 67. Doonor- N_D ja aktseptorlisandi N_A kontsentratsiooni kõverad

Joon. 68. Kontsentratsioonide vahe $N_D - N_A$ sõltuvus kaugusest kristalli pinnast





takse lisandite paar selliselt, et üks oleks aktseptor ja teine doonor, aga et nende difusioonitegurid oleksid erinevad. Kogu difusiooniprotsessi ajaks luuakse pooljuhi pinnale ühtlane lisandite kontsentratsioon. Joonisel 67 on toodud lisandite kontsentratsioonide jaotuskõverad kristallis pärast üheaegset difusiooni. Doonorlisandi kontsentratsioon on N_D ja aktseptorlisandil N_A. Pooljuhtmaterjali esialgne doonorlisandi kontsentratsioon oli N_{D0}.

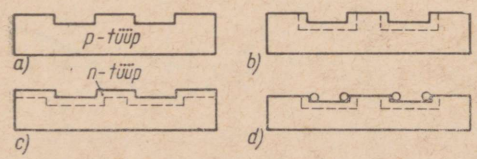
Tekib kaks *p-n*-siiret. Üks seal, kus doonorlisandi summaarne jaotuskõver $N_D + N_{D0}$ lõikab aktseptori jaotuskõverat N_A (punktis x_{01}), aga teine kõvera N_A ja sirge N_{D0} lõikumiskohal (punkt x_{02}). Joonisel 68 on toodud doonor- ja aktseptorlisandite kontsentratsioonide vahe sõltuvus kaugusest kristalli pinnast.

Üheaegse difusiooni meetodi suureks puuduseks on see, et lisandite kontsentratsiooni ja temperatuuri ei ole võimalik eraldi reguleerida. Seepärast kasutatakse rohkem lisandite järgnevat difusiooni. Sellisel juhul kulgeb protsess kahes staadiumis. Esimesena difundeeritakse lisand, millel on väiksem difusioonitegur, ja seejärel suurema difusioonitegurigа lisand. Selline järjekord võimaldab paremini ja täpsemalt reguleerida suurema difusioonitegurigа lisandi difundeerumist. Järgneva difusiooni eeliseks on veel asjaolu, et mitme *p-n*-siirde üheaegseks saamiseks on võimalik kasutada ühesuguse difusioonitegurigа doonoreid ja aktseptoreid. Difusiooni sügavuse määrab sellisel juhul protsessi esimese ja teise staadiumi kestus.

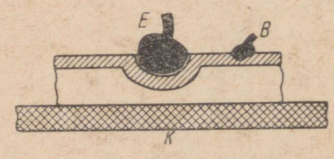
7.4. SULANDAMIS-DIFUSIOONIMEETOD

Sulandamis-difusioonimeetodil saadakse transistori üks siire (kollektorsiire) difusiooni teel ja teine (emittersiire) sulandamise teel.

p-tüüpi juhtivusega germaaniumplaadikesele tehakse ultraheliga kindlate mõõtmetega süvendid (joon. 69, *a*). Seejärel difundeeritakse plaadikesse antimoni, millega tekitatakse tervele plaadipinnale *n*-tüüpi juhtivusega kiht (joon. 69, *c*). Järgnevalt lihvitakse *n*-tüüpi juhtivusega kiht plaadilt maha nii, et see jääb ainult süvenditesse (joon. 69, *b*). Plaadi pinna puhastamiseks



Joon. 69. Suland-difusioontransistori saamine



Joon. 70. Suland-difusioontransistori läbilõige

teda söövitatakse, kusjuures süvendites olev *n*-kiht kaitstakse vahaga, mis pärast söövitamist eemaldatakse. Iga süvendi otstesse asetatakse rangelt doseeritud elektroodsulamite kuulikesed (joon. 69, *d*).

Emitteri kontakti jaoks kasutatakse sulamit, mis sisaldab indiumi, galliumi, antimoni, aga baasi kontakti jaoks — plii ja antimoni sulamit.

Emitteri sulam lahustab difundeeritud *n*-kihi ning samal ajal difundeeruvad sulamist kristalli aktseptor- ja doonorlisandid. Kuna antimoni difusioonitegur on tunduvalt suurem kui indiumil ja galliumil, siis moodustab ta esialgse *n*-tüüpi juhtivusega kihiga pideva frondi — transistori baasiala. Rekristalliseerunud indiumi ja galliumi *p*-tüüpi juhtivusega sulam moodustab transistori emitteriala. Baasi sulam moodustab kontakti difundeeritud *n*-tüüpi juhtivusega alaga. Kollektoriks on *p*-tüüpi juhtivusega lähtegermaaniumplaadike.

Pärast emitteri ja baasi sulandamist lõigatakse plaat tükkideks nii, et igale tükikesele jääks üks süvend emitteri ja baasi sulami tilgakestega. Seejärel joodetakse kollektori kontakt kristalli külge indiumi ja tina sulamiga.

Joonisel 70 on toodud antud meetodil valmistatud transistori läbilõige.

7.5. FOTOLITOGRAAFILINE MEETOD

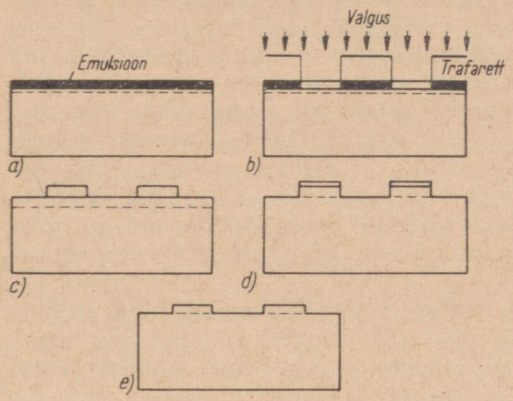
Fotolitograafilisel meetodil võib pooljuhtplaadikesele anda mistahes soovitava kuju. Fotolitograafilise meetodi suureks eeliseks on kõigi operatsioonide lihtsus ja saavutatav täpsus, mis võimaldab suurendada tähtsamate tehnoloogiliste operatsioonide tootlikkust pooljuhttoodete valmistamisel.

Fotolitograafilise töötlemise meetod seisneb järgmises.

Pooljuhtmaterjalist plaadikesele kantakse vedel fototundliku emulsiooni kiht, mis pärast kuivatamist moodustab plaadi pinnale fototundliku kile. Kilet valgustatakse vastavalt tema koostisele kas tavalise või ultravioletse valgusega läbi fotošablooni, kust saadakse ainult valged või mustad toonid. Kohtadel, kuhu langes valgus, fototundlik kile polümeriseerub ja muutub teatud kindlas lahustis lahustumatuks. Need alad aga, mis jäid valgustamata, lahustuvad hästi. Pärast ilmutamist ja kinnitamist valgustamata kohtadel kile lahustub, kuna valgustatud aladel kile säilib. Et suurendada kile vastupidavust hapete toimele, lastakse teda polümeriseeruda antud emulsioonile ettenähtud temperatuuril. Pärast sellist töötlemist on plaadike valmis järgmisteks operatsioonideks, nagu metalliseerimine või söövitamine. Söövitamisega antakse plaadi pinnale soovitav kuju — kanalid ja kühmud. Söövitamise ajal peab kile olema tihedalt vastu plaadi pinda,

ainult sellisel juhul toimub söövitamine kilest kaitsmata kohtadelt. Pärast söövitamist eraldatakse kile spetsiaalse lahustiga.

Valgustundlikku kilet kasutatakse tihti pooljuhi pinna või selle osade kaitsmiseks metalliseerimise eest. Metalliseerida võib kolmel viisil: keemiliselt, elektriliselt ja vaakuumpihustamise teel.



Joon. 71. Fotolitograafilise töötlemise skeem:
a — pärast emulsiooniga katmist; *b* — valgustamine; *c* — pärast ilmutamist ja kinnitamist; *d* — pärast söövitamist; *e* — pärast emulsiooni lahustamist

Vaakuum- ja keemiliselt pihustamisel metalliseeritakse kogu pooljuhi pind, ka need osad, mis on kaetud kilega. Hiljem eraldatakse vastava lahusti abil kaitsekile koos sellel asuva metalliga, kusjuures jääb puutumatuks metalliseeritud pind, mis on kantud otse plaadile. Elektrokeemiline sadestamine toimub ainult pooljuhi sellele pinnaosale, mis on kilest kaitsmata.

Joonisel 71, *a*, *b*, *c*, *d* ja *e* on toodud pooljuhtplaadi fotolitograafilisel meetodil töötlemise skeemid.

7.6. EPITAKSIAALKILEDE KASVATAMINE

Epitaksiaalkiled saadakse sadestamise teel. Sadestamine toimub gaasilisest faasist monokristallilise pooljuhtkristalli pinnale, kusjuures sadestunud kihi kristallivõre orientatsioon langeb täielikult ühte aluse kristallivõre orientatsiooniga. Sadestamist teostatakse näiteks termiliselt lagundatud germaaniumi või räni halogeniididest. See protsess koosneb kahest staadiumist. Esimene staadium on germaaniumi või räni halogeniidi aurustamine ja tema viimine aluseni. Teine staadium koosneb aurude termilisest lagundamisest ja räni või germaaniumi sadestamisest monokristallilisele alusele.

Epitaksiaalkilede sadestamist on kõige lihtsam vaadelda germaaniumi puhul. Nagu teada, reageerib germaanium joodiga:

$$Ge + 2J_2 \rightleftarrows GeJ_4.$$

Reaktsiooni kulgemine ühes või teises suunas sõltub temperatuurist. Temperatuuril 500° C tekib GeJ_4, aga temperatuuril 300° C eraldub germaanium.

Räni taandatakse tavaliselt $SiCl_4$-st vesinikuga 1250 ... 1300° C juures.

Sadestumise kiirus sõltub aurude ja aluse temperatuurist. Tavaliselt on epitaksiaalkile kasvamise kiiruseks 1 μm/min.

Üldiselt on võimalik sadestada igasuguseid aineid ükskõik millisele alusele, kuid ainult tingimusel, et nende kristallivõre konstandid ei oleks väga erinevad.

Epitaksiaalsel meetodil transistoride valmistamiseks võetakse madalaoomiline pooljuhtmaterjal ja kantakse sellele sama tüüpi juhtivusega kõrgeoomiline epitaksiaalkile. Ränitransistoride valmistamisel võetakse räni eritakistusega 0,01 ... 0,002 Ωcm. Pärast epitaksiaalkile sadestamist saadakse tavalisel difusioonimeetodil emitteri- ja baasialad.

Kui ühendada epitaksiaalkilede kasvatamise meetod difusiooni- ja sulandamismeetodiga, on võimalik valmistada väga mitmesuguseid pooljuhttooteid väga mitmesuguste parameetritega.

Epitaksiaalse sadestamise kasutamine parendab tunduvalt toodete kvaliteeti, kuna langeb ära vajadus plaate mehaaniliselt lihvida ja poleerida. See vähendab plaatide kristallistruktuuri mehaanilist rikkumist ning võimaldab transistori kõrgeoomilise kollektoriala parameetrite täpset kontrollimist ja reguleerimist.

Epitaksiaalsel meetodil võib valmistada dioode, transistore, tunneldioode, väga heade parameetritega *p-n-p-n*-struktuure, võib saada ka täiesti uusi, küllalt keerukate struktuuridega tooteid, mida tavaliste tehnoloogiliste võtetega oli kas raske või võimatu valmistada. Tulevikus leiab epitaksiaalne meetod kõige laialdasemat kasutamist tahkete skeemide valmistamisel.

7.7. *p-n-p-n*-STRUKTUURIDE SAAMINE

Generaator- ja relaksatsioonlülitustes on väga vajalikud elemendid, mille pinge-voolu tunnusjoontel on negatiivse diferentsiaalse takistusega osa. Tavaliselt saadakse negatiivne takistus nendes skeemides mittelineaarsete elementide ja välise tagasisidestusega.

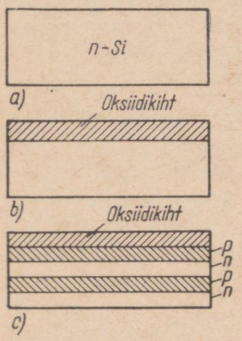
Need skeemid muutuvad aga väga lihtsaks, kui kasutada *p-n-p-n*-struktuure, millel väline tagasisidestus asendub elemendi sisemise tagasisidestusega.

p-n-p-n-struktuure on võimalik saada mitmel tehnoloogilisel meetodil: monokristallide kasvatamisel, sulandamisel, difundeerimisel ja nende meetodite kombineerimisel. Praktikas on enam levinud difundeerimismeetod ja sulandamis-difundeerimismeetod.

Vaatleme *p-n-p-n*-struktuuri saamist *n*-tüüpi juhtivusega räni-

kristallis difundeerimismeetodil. Kristalli üks külg kaetakse keemiliselt oksiidikilega, teine külg aga jääb oksiidist vabaks. Seejärel difundeeritakse kõrgel temperatuuril fosfor ja gallium üheaegselt gaasilisest faasist. SiO_2 kile on maskiks, mis ei takista galliumi difundeerumist, kuid peaaegu täiesti takistab fosfori difusiooni.

Seega saame SiO_2-ga kaetud küljel galliumi difusiooni tõttu *p*-juhtivusega ala. Kristalli katmata küljel toimub aga galliumi ja fosfori üheaegne difusioon. Kuna aga galliumi difusioonitegur ränis on suurem kui fosforil, siis difundeerub gallium sügavamale ja moodustab kristalli sees *p*-tüüpi juhtivusega ala. Et fosfori tihedus on suurem kui galliumil, siis moodustub pinnakihis *n*-tüüpi juhtivusega ala.



Joonisel 72, *a*, *b* ja *c* on toodud *p-n-p-n*-struktuuri saamise skeemid.

Pärast soovitud struktuuri saamist söövitatakse oksiidikiht ja kinnitatakse elektroodid.

Joon. 72. *p-n-p-n*-struktuuri saamine:
a — *n*-tüüpi juhtivusega Si kristall; *b* — enne difusiooni; *c* — pärast difusiooni

7.8. TERMILISE TÖÖTLEMISE SEADMED

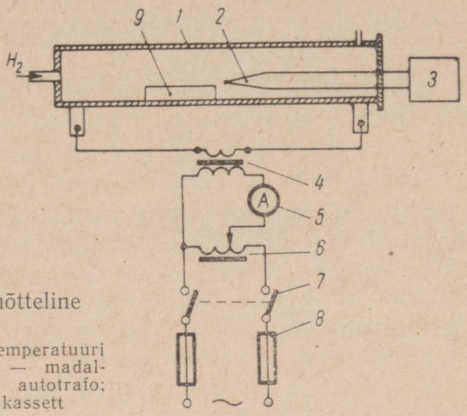
Vesinikahjud ja vaakuumahjud. Vesinik- ja vaakuumahjusid kasutatakse mitmesuguste termiliste operatsioonide läbiviimiseks vesiniku ja lämmastiku keskkonnas või vaakuumis: emitteri ja baasi sulandamine, kristalli jootmine kristallihoidjale või alusele, metallide lõõmutamine jne.

Vesinik-toruahjud. Vesinik-toruahjusid (joon. 73) ehitatakse temperatuuri jaoks kuni 1500 °K (≈ 1200° C). Nad on lihtsa ehitusega ja töökindlad. Ahju toru kasutatakse nii kuumutamisruumina kui ka kütteelemendina. Sellistel ahjudel on väga väike soojuslik inerts ja nad võimaldavad väga kiiresti muuta temperatuuri.

Ahju toru valmistatakse kuumakindlast terasest. Temperatuuri mõõdetakse kromell-alumel- (XA) või plaatina-plaatinaroodium- (ПП) termopaariga.

Temperatuuri reguleeritakse käsitsi autotrafoga või automaatselt.

Torusse juhitakse N_2 või H_2. Ahjust väljuv vesinik põletatakse, et vältida vesiniku kogunemist ruumi ja õhuga plahvatusohtliku segu tekkimist.



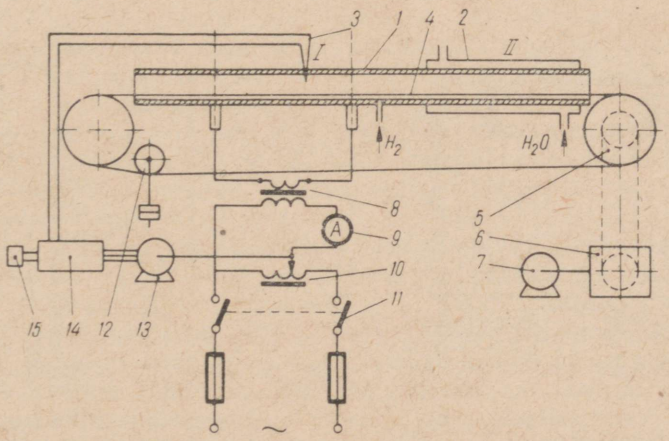
Joon. 73. Vesinik-toruahju põhimõtteline skeem:

1 — ahju toru; *2* — termopaar; *3* — temperatuuri näitav või registreeriv mõõteriist; *4* — madalpingetrafo; *5* — ampermeeter; *6* — autotrafo; *7* — lüliti; *8* — kaitsmed; *9* — kassett

K o n v e i e r a h j u d. Konveierahjude (joon. 74) eeliseks on suur tootlikkus. Neid kasutatakse seeria- ja masstootmises.

Konveierahju toru on tavaliselt jaotatud kahe erineva temperatuuriga tsooniks: kuumutustsoon ja jahutustsoon. Piki toru liigub konveierilint. Torusse juhitakse H_2 või N_2.

Konveierahju ЖК40-06 maksimaalne temperatuur on 1100° K (~800° C). Temperatuuri reguleerimine toimub automaatregulaa-



Joon. 74. Konveierahju ЖК40-06 põhimõtteline skeem:

I — kuumutustsoon; *II* — jahutustsoon; *1* — toru; *2* — veesärk; *3* — termopaar; *4* — konveierilint; *5* — vedav rull; *6* — reduktor; *7* — elektrimootor; *8* — madalpingetrafo; *9* — ampermeeter; *10* — autotrafo; *11* — lüliti; *12* — lindi pingutusrull; *13* — servomootor; *14* — temperatuuriregulaator; *15* — temperatuuriseadur

toriga. Regulaator käivitab elektrimootori, mis keerab autotrafo käepidet ühele või teisele poole. Ahju kasutatakse kristallide jootmiseks kristallihoidjale.

Konveierahi ЖК40-10 on ette nähtud klaasi kokkujootmiseks metalliga koos järgneva lõõmutamisega. Ahjus on 3 tsooni:

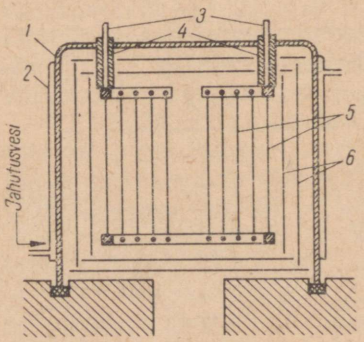
I — jootetsoon maksimaalse temperatuuriga 1500 °K (~1250° C); II — lõõmutustsoon; III — jahutustsoon.

Ahju korpus on valmistatud terasplekist ja seestpoolt vooderdatud šamottkividega (tulekindel kivi). Kanali ristlõige on 100 × 100 mm. Juhtimispult koosneb kahest kapist: soojusmõõteriistade ja pingeregulaatorite stend. Pinge reguleerimine toimub käsitsi autotrafode abil. Ahi on varustatud gaasisüsteemiga N_2 ja H_2 juhtimiseks töötsoonidesse.

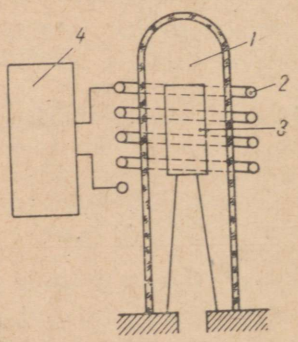
Vaakuumahjud. Vaakuumahjude (joon. 75) põhimõtteline skeem sarnaneb vaakuumseadmete üldise skeemiga. Vahe seisab ainult selles, et nende tööruumis (kupli all) on võimalik tekitada kõrgeid temperatuure. Temperatuur saadakse kas kupli alla paigutatud kütteelementide abil või kõrgsageduskuumutamisega.

Kütteelemendid valmistatakse molübdeen- või volframtraadist. Et vähendada soojuskadusid ja kupli kuumenemist, kasutatakse molübdeenplekist varjeid.

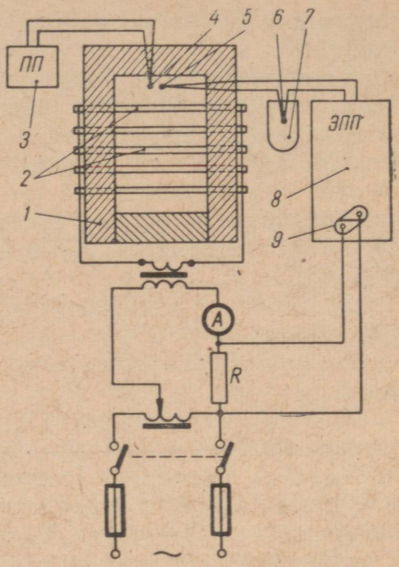
Kõrgsageduskuumutusseade (joon. 76) koosneb vaakuumseadmest ja kõrgsagedusgeneraatorist. Kõrgsagedusgeneraatoris genereeritakse elektrivõnkumine sagedusega 300 . . . 490 kHz, mis juhitakse induktorisse. Induktor asetatakse vaakuumseadme kuplile. Kuppel peab olema valmistatud klaasist, kõrgemal temperatuuril töötamise jaoks aga kvartsist.



Joon. 75. Vaakuumlõõmutusahju kupli ehitus:
1 — metallkorpus; *2* — veesärk; *3* — voolujuhtmed; *4* — isolaatorid; *5* — molübdeenvardad; *6* — varjed



Joon. 76. Kõrgsageduskuumutamise põhimõtteline skeem:
1 — kvartskuppel; *2* — induktor; *3* — kuumutatav ese; *4* — kõrgsagedusgeneraator



Joon. 77. Kamberahju KO-14 temperatuuri reguleerimise põhimõtteline skeem:
1 — kamberahi KO-14; *2* — siliitvardad; *3* — potentsiomeeter; *4* — kontrolltermopaar; *5* — termopaar; *6* — termopaari külm jootekoht; *7* — termostaat; *8* — automaatpotentsiomeeter koos temperatuuriregulaatoriga; *9* — regulaatori elavhõbekontaktid

Kõrgsagedusvälja toimel indutseeritakse voolu juhtivates esemetes (grafiitkassetid, metalldetailid) pöörisvoolud, mille toimel esemed kuumenevad. Kõrgsagedusega saab kuumutada ainult elektrit juhtivaid esemeid, isolaatorid ei kuumene.

K a m b e r a h j u d. Kamberahjudes toimuvad difusiooni- ja oksüdeerimisprotsessid.

Kamberahju KO-14 maksimaalseks temperatuuriks on 1600° K (~ 1350° C). Ahi koosneb metallkestast, mis on seestpoolt vooderdatud tulekindlast materjalist voodriga. Kuumutamiseks kasutatakse siliitvardaid. Joonisel 77 on kujutatud kamberahju KO-14 temperatuuri reguleerimise põhimõtteline skeem.

Kui temperatuur tõuseb üle etteantud väärtuse, siis lülitub ahju toiteahelasse lisatakisti *R*. Vool toiteahelas väheneb ja temperatuur hakkab langema. Temperatuuri langemisel alla normi lühistatakse lisatakisti ja toitevool suureneb.

T e r m o s t a a d i d j a k u i v a t u s k a p i d. Termostaate ja kuivatuskappe kasutatakse detailide kuivatamiseks ja hoidmiseks püsiva temperatuuri, s. o. kuni 500° K (~ 200° C) juures. Oma ehituselt on nad sarnased. Termostaat või kuivatuskapp on kahekordsete seintega nelinurkse või silindrilise väliskujuga kamber. Sisemise kambri ümber on mähitud küttespiraal. Seinte vahe on täidetud soojusisolatsiooniga (asbest).

Temperatuuri reguleerimiseks kasutatakse väga sageli bimetallist termoreleesid (joon. 78).

Bimetallplaat koosneb kahest erineva joonpaisumisteguriga metallplaadist, mis on kokku joodetud. Temperatuuri tõustes pain-

dub plaat väiksema paisumisteguriga plaadi poole ja lahutab kontaktid.

Temperatuuri mõõtmine. Vastavalt rahvusvahelisele kokkuleppele mõõdetakse temperatuuri nn. termodünaamilise skaala järgi. Temperatuuri hakatakse lugema absoluutsest nullist. Mõõtühikuks on Kelvini kraad. Kelvini kraadi väärtus määratakse vee kolmikpunkti (vee tahke, vedela ja gaasilise oleku tasakaalupunkti) abil, millele vastavaks temperatuuriks on võetud 273,16° K. Termodünaamilise skaala järgi on jää sulamispunkt 273,15° K.

Seniajani on veel kasutusel ka Celsiuse skaala, mille järgi on jää sulamispunkt 0° C.

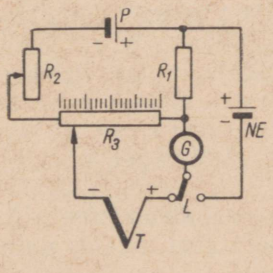
Temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse termomeetreid ja termopaare.

Klaastermomeetrid. Termomeeter kujutab endast klaastoru, mille sisse on asetatud kapillaar. Viimane lõpeb kolvikesega, milles asub töövedelik. Temperatuuri mõõtmisel tõuseb töövedelik paisumise tagajärjel mööda kapillaari üles seda kõrgemale, mida kõrgem on temperatuur. Kapillaari kõrvale on asetatud skaala. Töövedelikuna kasutatakse temperatuurivahemikus 270 . . . 800° K (~ 0 . . . 500° C) elavhõbedat ja temperatuuridel alla 270° K (alla 0° C) piiritust.

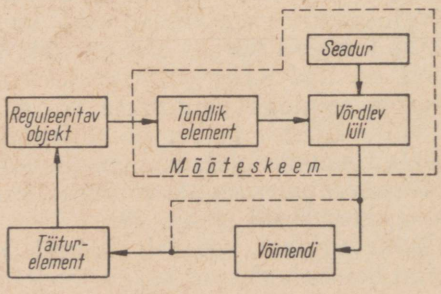
Elavhõbetermomeetrid jaotatakse järgmistesse põhitüüpidesse:

1) laboratoorsed termomeetrid. Need on suure täpsusega termomeetrid ja neid kasutatakse kontrollmõõtmisteks;

Joon. 78. Bimetallist termorelee põhimõtteline skeem:
1 — bimetallplaat; *2* — kontaktid; *3* — termostaadi küttemähis



Joon. 79. Potentsiomeetri põhimõtteline skeem:
T — termopaar; *P* — patarei; *NE* — normaalelement; *G* — galvanomeeter; *L* — lüliti



Joon. 80. Automaatreguleerimise põhimõtteline skeem

2) tehnilised termomeetrid. Neid kasutatakse tööstuses ja laboratooriumides temperatuuri mõõtmiseks;

3) kontakttermomeetrid. Neid kasutatakse temperatuuri reguleerimiseks ja signaliseerimiseks. Kontakttermomeetri kapillaari alumisse ossa on joodetud liikumatu kontakt, ülemisse ossa on asetatud liikuv kontakt, mida on võimalik nihutada soovitud jaotusele väikese püsimagneti abil.

Termopaarid. Kui kaks erinevast metallist traati ühte otsa pidi kokku joota ja seda jootekohta kuumutada, siis traadi vabade otste vahel tekib termoelektromotoorjõud. Niisugust süsteemi nimetatakse termopaariks. Termoelektromotoorjõu suurus sõltub kokkujoodetud traatide materjalist ja jootekoha ning vabade otste temperatuuride vahest. Kui termopaari vabad otsad ühendada mõõteriistaga, siis võib mõõta termo-emj. ja järelikult otsustada ka temperatuuri üle. Termo-emj. mõõdetakse millivoltmeetriga või potentsiomeetriga. Potentsiomeetriga mõõdetakse nn. kompensatsioonimeetodil (joon. 79).

Potentsiomeetri toiteallikas ja termopaar on lülitatud nii, et nende elektromotoorjõud on vastassuunalised. Kalibreeritud takisti R_3 liikuvat kontakti nihutades leitakse punkt, kus patarei pinge ja termopaari emj. on võrdsed. Sellisel juhul termopaari ahelas vool puudub ning galvanomeetri osuti näitab nulli. R_1, R_2 ja normaalelement on potentsiomeetri töövoolu reguleerimiseks.

Kompensatsioonimeetodil on millivoltmeetriga mõõtmise ees rida eeliseid: potentsiomeetri näit ei sõltu termopaari ja ühendusjuhtmete takistusest, potentsiomeetri tundlikkus on suurem.

Nõukogude Liidus toodetakse järgmisi termopaare:

1) plaatinaroodium-plaatinatermopaarid ТПП, mille mõõtepiirkond on kuni 1600° K (~ 1300° C) ja lühiajaliselt kuni 1900° K (~ 1600° C);

2) kromell-alumeltermopaarid, ТХА, mille mõõtepiirkond on kuni 1300° K (~ 1000° C);

3) kromell-kopelltermopaarid ТХК, mõõtepiirkond kuni 900° K (~ 600° C).

Temperatuuri reguleerimine. Temperatuuri reguleeritakse käsitsi või automaatselt. Joonisel 80 on esitatud automaatreguleerimise põhimõtteline blokkskeem.

Tundlik element (termopaar) reageerib parameetri (temperatuuri) muutusele ja «tõlgib» selle mõõteseadmele arusaadavasse keelde (emj.). Seaduriga antakse ette, millisel väärtusel parameetrit on vaja hoida. Võrdlev lüli võrdleb tundlikult elemendilt ja seadurilt saadud signaale ja annab vastavalt sellele käsu täiturelemendile. Kuna võrdlevast lülist saadud käsk on liiga nõrk täiturelemendi käivitamiseks, siis käsku tavaliselt võimendatakse. Täiturelement mõjutab reguleeritavat objekti, vähendades või suurendades reguleeritavat parameetrit (temperatuuri).

7.9. VAAKUUMITEHNIKA

Üldmõisteid vaakuumist. Vaakuumiks nimetatakse gaaside või aurude hõrendatud olukorda. Sõna «vacuum» pärineb ladina keelest ja tähendab «tühjus».

Gaasi molekulid on pidevas korrapäratus liikumises. Selle liikumise tagajärjel põrkavad molekulid sagedasti üksteisega või anuma seintega kokku. Molekulide löögid vastu anuma seinu tekitavadki gaasi rõhu. Kokkupõrgete arv sõltub molekulide arvust ruumalaühikus. Kokkupõrgete energia oleneb gaasi temperatuurist. Mida kõrgem on temperatuur, seda kiiremini molekulid liiguvad ja seda suurema hooga põrkavad nad vastu anuma seinu. Rõhk anumas on võrdeline gaasi molekulide arvuga ruumalaühikus ja gaasi temperatuuriga.

Keskmist vahemaad, mille molekul läbib ühest kokkupõrkest teiseni, nimetatakse molekuli vaba lennutee pikkuseks λ.

Gaasi hõrendamisel molekulide vaba lennutee pikkus suureneb ja molekulide omavahelised kokkupõrked järjest harvenevad. Küllalt suure hõrenduse korral molekulide omavahelised kokkupõrked praktiliselt puuduvad ja molekulid põrkavad kokku ainult anuma seintega. Madalvaakuumi korral on molekulide vaba lennutee pikkus väiksem kui anuma lineaarmõõtmed, s. t. $\lambda < d$, keskmise vaakuumi korral $\lambda \approx d$ ja kõrgvaakuumi korra $\lambda > d$.

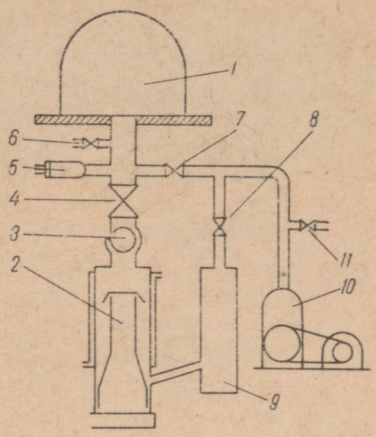
Gaasi omadused (soojusjuhtivus, viskoossus) ja gaasides toimuvad protsessid (difusioon, aurustamine) sõltuvad suurel määral sellest, kas gaasi molekulid põrkavad sagedamini kokku omavahel või toimuvad kokkupõrked sagedamini anuma seintega.

Metalli kuumutamisel atmosfäärirõhul aurustamist ei toimu. Metalli pinnalt lahkunud molekulid põrkavad kokku õhu molekulidega ja peegelduvad enamasti metalli pinnale tagasi. Kõrgvaakuumi korral pinnalt lahkunud metallimolekulidel õhu molekulidega kokkupõrkeid ei toimu ja nad lendavad vabalt kuni anuma seinteni ja sadenevad nendel. Vaakuumaurustamist kasutatakse pooljuhtide tehnikas laialdaselt.

Gaasi soojusjuhtivus sõltub soojust kandvate osakeste arvust (molekulide arvust) ruumalaühikus ja osakeste vaba lennutee pikkusest. Madala vaakuumi korral gaasi soojusjuhtivus vaakuumist ei sõltu: soojust kandvate osakeste arvu vähenemine kompenseeritakse vaba lennutee pikkuse suurenemisega. Kõrgvaakuumi korral on gaasi soojusjuhtivus võrdeline molekulide arvuga ruumalaühikus. Sellel põhineb termopaarvaakuummeetri ehitus.

Vaakuumi tekitamine. Pooljuhtide tööstuses kasutatakse vaakuumi alates atmosfäärirõhust kuni vaakuumini $10^{-9}\ \frac{N}{m^2}$ ($\approx 10^{-11}$ mm Hg).

Vaakuumi tekitamiseks kasutatakse mitmesuguseid pumpi, mis ühendatakse kokku vaakuumseadmeks. Vaakuumseadet täienda-



Joon. 81. Vaakuumseadme põhimõtteline skeem:

1 — vaakuumseadme tööruum (kuppel); *2* — difusioonipump; *3* — vedela lämmastikuga püünis; *4* — kõrgvaakuumi klapp; *5* — vaakuummeetri andur (lamp); *6* — õhuventiil, *7* — eelvaakuumi ventiil; *8* — ballooni ventiil; *9* — eelvaakuumballoon; *10* — eelvaakuumpump; *11* — õhuventiil

takse veel vastavalt vajadusele vedela lämmastiku püünistega, getteritega (gaasineelajatega) ja vaakuumi mõõtmiseks vajalike mõõteriistadega. Vaakuumseadme juurde kuuluvad ühendustorustik ja mitmesugused klapid ning kraanid lülituste tegemiseks.

Vaakuumseadme põhimõtteline skeem on toodud joonisel 81.

Vaakuumpumpade iseloomustamiseks kasutatakse järgmisi näitajaid:

1) algrõhk (eelvaakuum) — vaakuum, mis on vaja tekitada anumas, et pump saaks tööle hakata. Selles suhtes võib pumbad jaotada kahte rühma:

a) pumbad, mis ei vaja eelvaakuumi (näiteks mehaanilised pumbad);

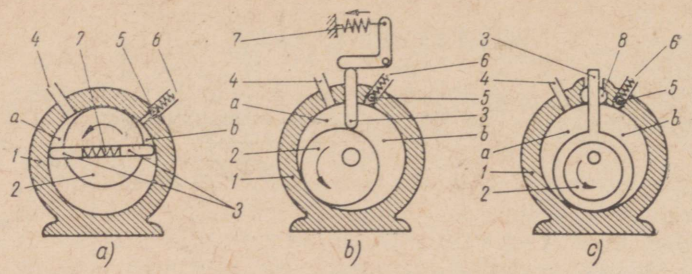
b) pumbad, mis vajavad eelvaakuumi (näiteks difusioonipumbad);

2) piirvaakuum — maksimaalne vaakuum, mida antud pumbaga võib saavutada kinnises ruumis;

3) pumpamise kiirus — gaasi kogus liitrites, mida pump eemaldab antud rõhu juures ajaühiku jooksul. Pumpamise kiirus sõltub rõhust ja tavaliselt antakse see graafikul.

M e h a a n i l i s e d p u m b a d. Mehaanilisi pumpi kasutatakse kõigis vaakuumseadmetes. Nende abil saadakse vaakuum kuni $1 \frac{N}{m^2}$ ($7{,}5 \times 10^{-3}$ mm Hg). Levinumad tüübid on: 1) rootorplaatidega, 2) staatorplaadiga ja 3) šarniirplaadiga rotatsioonpumbad. Mehaaniliste pumpade tööpõhimõte põhineb gaasi mehaanilisel väljatõrjumisel pumba tööruumist pumba liikuvate osade poolt. Joonisel 82, *a*, *b* ja *c* on esitatud kõik kolm pumbatüüpi.

Rootori pöörlemisel noolega näidatud suunas ruumiosas *a* tekib hõrendus ja pumbatavast anumast imetakse sinna uut gaasi. Ruumiosas *b* surutakse gaas kokku ja läbi kuulventiili *5* pumbast välja.



Joon. 82. Mehaanilised pumbad:

a — rootorplaatidega pump; *b* — staatorplaadiga pump; *c* — šarniirplaadiga pump; *1* — staator; *2* — rootor; *3* — plaat; *4* — imitoru; *5* — kuulventiil; *6* — väljalasketoru; *7* — plaatide survevedru; *8* — šarniirliigend

Pumbad asetatakse metallkorpusesse, mis täidetakse vaakuumiõliga BM-4. Õli tihendab kokkupuutepindu ja määrib liikuvaid detaile.

D i f u s i o o n i p u m b a d. Difusioonipumpasid kasutatakse kõrgvaakuumi tekitamiseks kuni $10^{-5}\frac{N}{m^2}$ ($\approx 10^{-7}$ mm Hg). Difusioonipumba töö põhineb aurujoa imeval toimel. Difusioonipump vajab normaalseks tööks eelvaakuumi. Sellepärast kasutatakse neid alati koos mehaaniliste pumpadega. Joonisel 83 on esitatud difusioonipumba põhimõtteline skeem.

Töövedelikku kuumutatakse aurustajas *4*. Tekkiv aur juhitakse mööda aurutoru *3* düüsi *2*. Düüsist väljuv aurujuga paiskub kaldu vastu külma, veega jahutatud seina. Seinaga kokkupuutumisel aur jahtub ja kondenseerub vedelikus. Vedelik voolab mööda pumbaseina tagasi aurustajasse. Nii toimub töövedeliku pidev ringkäik.

Düüsist suure kiirusega väljapaiskuv aurujuga haarab temasse tungivad (difundeeruvad) gaasimolekulid endaga kaasa ja paiskab nad pumba alumisse ossa. Eelvaakuumpump imeb siit gaasi välja.

V a a k u u m i õ l i d. Vaakuumiõlid võib jaotada kahte rühma:

1) eelvaakumiõlid — kasutatakse rotatsioonpumpade määrimiseks ja tihendamiseks;

2) difusiooniõlid — kasutatakse difusioonipumpade töövedelikuna.

Eelvaakuumiõlidena võib kasutada enamikku häid mineraalseid masinaõlisid viskoossusega 5 ... 10° Engleri järgi 323° K (50° C) juures. Õli viskoossus peab võimalikult vähe sõltuma temperatuurist. Õli peab omama häid määrivaid omadusi ja väikest aururõhku. Aururõhk ei tohi olla üle $0{,}7\frac{N}{m^2}$ ($5 \cdot 10^{-3}$ mm Hg). Eelvaa-

kuumiõli saadakse nafta ümbertöötamisel. Levinum eelvaakumiõli on mark BM-4.

Difusiooniõlisid saadakse nafta raskete jääkide vaakumdestillatsioonil või sünteetilisel teel.

Difusiooniõlidele esitatakse järgmised nõuded:

1) neil peab olema väike aururõhk, toatemperatuuril alla 10^{-4} $\frac{N}{m^2}$ ($\approx 10^{-6}$ mm Hg);

2) nad ei tohi laguneda pumba töötemperatuuril;

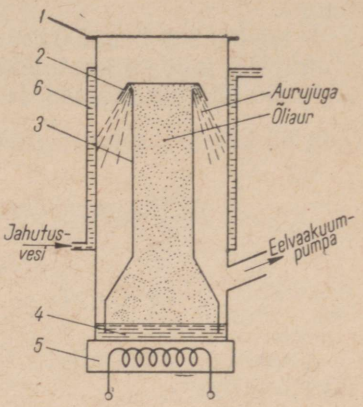
3) ei tohi reageerida õhuga pumba töötemperatuuril ja töörõhul;

4) nad peavad võimalikult vähe endas lahustama gaase ja aure;

5) keemistemperatuur ei tohi olla liiga kõrge;

6) aurumissoojus peab olema võimalikult väike.

Neile tingimustele vastab difusiooniõli Д-1. Eriti hästi vastavad neile tingimustele räniorgaanilised ehk nn. silikoonõlid. Silikoonõlisid saadakse sünteetiliselt.



Joon. 83. Difusioonipumba põhimõtteline skeem:
1 — äärik vaakuumseadmega ühendamiseks; *2* — düüs; *3* — aurutoru; *4* — aurustaja; *5* — elektripliit, *6* — jahutussärk

Vaakuumi parendamine. Vaakuumpumbad pumpavad kiiresti gaase, kuid on väheefektiivsed aurude pumpamisel. Teiselt poolt on nad ise töövedeliku (õli) aurude allikaks. Et saada vaakuumi üle 10^{-5} $\frac{N}{m^2}$ ($\approx 10^{-7}$ mm Hg), on vaja kondenseerida vaakuumisüsteemis olevad aurud. Selleks kasutatakse mitmesuguseid vedela lämmastikuga jahutatavaid püüniseid (joon. 84, *a*, *b* ja *c*). Vedela lämmastiku temperatuur on 80° K (—193° C).

Joon. 84. Vedela lämmastikuga jahutatavaid püüniseid:
a — U-kujuline; *b* — kerakujuline; *c* — toru-torus-tüüpi püünis

Peale püüniste kasutatakse ka gaaside ja aurude neelajaid, nn. gettereid. Getterina kasutatakse aktiivsütt, mitmesuguseid metalle (baarium, magneesium, tantaal jt.). Getter asetatakse evakueeritavasse ruumi kas tabletina, plaatidena, traatidena või aurustatakse evakueeritava ruumi seinale.

Getterid seovad gaase ja aure kas füüsikaliselt (adsorptsiooni

teel) või astuvad nendega keemilisse reaktsiooni (kemosorptsioon).

Vaakuumi mõõtmine. Vaakuumi levinum mõõtühik on 1 mm Hg, mida nimetatakse ka torriks. Vastavalt rahvusvahelisele mõõtühikute süsteemile SI tuleb vaakuumi mõõtühikuna kasutada ühikut 1 njuuton ruutmeetri kohta ($1\,\frac{N}{m^2}$).

$$1\,\frac{N}{m^2} = 0{,}75 \cdot 10^{-2}\,\text{mm Hg} = 0{,}75 \cdot 10^{-2}\ \text{torri}$$

$$1\ \text{mm Hg} = 1\ \text{torr} = 133{,}322\,\frac{N}{m^2}.$$

Vaakuumi mõõtmiseks kasutatakse tavaliselt kahte tüüpi vaakuummeetreid:

1) termopaarvaakuummeeter mõõtepiirkonnaga kuni $10^{-1}\,\frac{N}{m^2}$ ($7{,}5 \cdot 10^{-4}$ mm Hg) ja

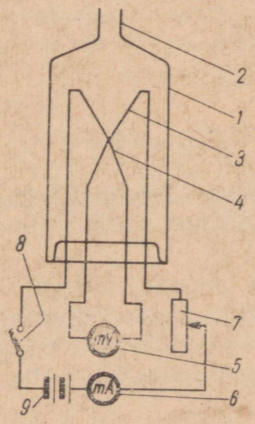
2) ionisatsioonivaakuummeeter mõõtepiirkonnaga

$$10^{-1}\,\frac{N}{m^2} \ldots 10^{-5}\,\frac{N}{m^2}\ (7{,}5 \cdot 10^{-4} \ldots 7{,}5 \cdot 10^{-8}\ \text{mm Hg}).$$

Termopaarvaakuummeetri tööprintsiibi aluseks on see, et gaasi soojusjuhtivus väheneb rõhu vähenemisel.

Termopaarvaakuummeeter (joon. 85) koosneb klaasballoonist *1*, millesse on asetatud kütteniit *3* ja termopaar *4* kütteniidi temperatuuri mõõtmiseks. Kütteniiti kuumutatakse elektrivooluga patareist *9*. Küttevoolu tugevus hoitakse reostaadiga *7* konstantne ja mõõdetakse milliampermeetriga *6*.

Kuna konstantse voolu korral sõltub kütteniidi temperatuur ümbritseva keskkonna soojusjuhtivusest, s. o. rõhust, siis võib millivoltmeetri gradueerida vaakuumiühikutes. Sellisel juhul näitab osuti otse vaakuumi suurust.

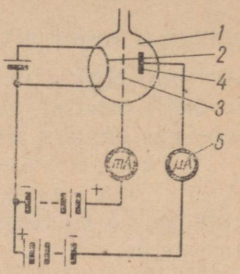


Joon. 85. Termopaarvaakuummeetri põhimõtteline skeem:
1 — klaasballoon; *2* — tuts vaakuumisüsteemiga ühendamiseks; *3* — kütteniit; *4* — termopaar; *5* — millivoltmeeter; *6* — milliampermeeter; *7* — reostaat; *8* — lüliti; *9* — patarei

Ionisatsioonivaakuummeeter (joon. 86) koosneb klaasballoonist *1*, mille sees asuvad katood *2*, võre *3* ja kollektor *4*.

Võrel on katoodi suhtes positiivne potentsiaal ja kollektoril negatiivne. Ionisatsioonimanomeeter töötab järgmiselt. Katoo-

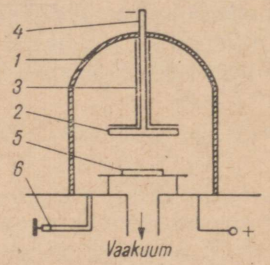
dist *2* väljuvad elektronid lendavad võre *3* positiivse potentsiaali tõttu võrele. Oma teel põrkavad nad kokku gaasi molekulidega ja ioniseerivad viimaseid. Positiivsed gaasiioonid lendavad negatiivselt laetud kollektorile *4*, tekitades kollektorivoolu, mis registreeritakse mikroampermeetriga *5*. Kollektorivool on võrdeline positiivsete ioonide arvuga, s. o. rõhuga klaasballoonis. Klaasballoon ühendatakse uuritava vaakuumisüsteemiga.



Joon. 86. Ionisatsioonivaakuummeetri põhimõtteline skeem:
1 — klaasballoon; *2* — katood; *3* — võre; *4* — kollektor; *5* — mikroampermeeter

K a t o o d p i h u s t a m i n e. Katoodpihustamise meetodil on võimalik saada õhukesi metallikilesid, mõnel juhul ka dielektrilisi (näit. SiO_2) kilesid. Katoodpihustamise skeem on toodud joonisel 87.

Vaakuumkupli *1* kõrgepingesisendi *4* külge asetatakse pihustatavast metallist plaat *2*, mis on katoodiks. Metalliseeritav detail asetatakse 40 . . . 50 mm kaugusele katoodist. Katood ühendatakse kõrgepingealaldi negatiivse klemmiga. Positiivne klemm maandatakse. Katoodile antakse pinge 1,5 . . . 2 kV. Kupli all tekitatakse vaakuum ligikaudu $2\frac{N}{m^2}$ ($\approx 10^{-2}$ mm Hg) nii, et katoodi pimeruumi laius oleks 10 . . . 20 mm. Selles osas toimub gaasi molekulide põrkeionisatsioon katoodist väljuvate elektronide toimel. Gaasi ioone kiirendab elektriväli. Põrgates kokku katoodiga, löövad nad sellest välja metalliosakesi, mis sadenevad ümbritsevatele esemetele.

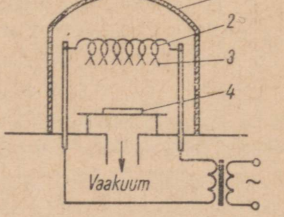


Joon. 87. Katoodpihustamine:
1 — vaakuumkuppel; *2* — pihustatavast metallist plaat; *3* — isolaator; *4* — kõrgepingesisend; *5* — metalliseeritav detail; *6* — nõelventiil

Katoodpihustamise kiirus oleneb pingest, voolutugevusest, kuplialusest gaasist ja pihustatavast metallist. Väga hästi on pihustatavad Ag, Au, Cu, halvasti pihustuvad Si, Al, Mg.

T e r m i l i n e a u r u s t a m i n e. Mitmesugustest materjalidest õhukeste kiledega katmiseks on väga sobiv kasutada termilist aurustamist vaakuumis. Vaakuumis on aurustatavad paljud materjalid, mida atmosfäärirõhul aurustada ei saa.

Aurustatav materjal asetatakse raskesti sulavast metallist (volfram, tantaal)



Joon. 88. Termiline aurustamine:
1 — vaakuumkuppel; *2* — spiraal; *3* — aurustatav materjal; *4* — kaetav detail

spiraalile või laevukesse (joon. 88), mida kuumutatakse elektrivooluga. Kupli all tekitatakse vaakuum $10^{-2} \ldots 10^{-3} \frac{N}{m^2}$ ($\approx 10^{-4} \ldots 10^{-5}$ mm Hg).

Selle meetodi puuduseks on suur metallikulu, sest metall aurustub igas suunas ühteviisi ja katab kõik ümbritsevad esemed.

Vaakuumseadmete ekspluatatsioonireeglid. Ruum, kus asetsevad vaakuumseadmed, peab olema puhas, kuiv ja hästi ventileeritav. On nõutav hea loomulik ja kunstlik valgustus.

Vaakuumseadmeid teenindav personal peab rangelt täitma spetsiaalseid hügieenireegleid. Seadmete häireteta töötamisel on esimeseks nõudeks puhtus. Määrdunud, õliseid ja rasvaseid detaile puhastatakse algul bensiini, bensooli või trikloretüleeniga ja loputatakse üle piiritusega. Kõik detailid kuivatatakse kuuma õhuga. Keelatud on haarata vaakuumisse minevaid detaile paljaste kätega. Töötada tuleb kummikinnastes. Sobivaks puhastusmaterjaliks on batist või teised vähe ebemeid andvad materjalid. Puhastusmaterjaliks ei sobi vatt.

8. TRANSISTORIDE MONTAAŽ

8. 1. TRANSISTORIDE KONSTRUKTSIOONIELEMENDID

Pooljuhttoodete konstruktsioone on väga palju. Toote konstruktiivne lahendus sõltub tootele esitatud nõuetest ja valmistamise tehnoloogilistest võimalustest. Kõik transistorid koosnevad täielikult või osaliselt järgmistest elementidest (joon. 89): kristall, väljaviigud, kristallihoidja, koostatud armatuur, koostatud alus, *p-n*-siirde kaitsematerjalid ja absorbendid.

Järgnevalt vaadeldakse üksikute elementide ülesandeid ja neile esitatavaid nõudeid.

K r i s t a l l, a r m a t u u r b l o k k. Kristall on pooljuhttoote põhiliseks elemendiks. Kristalli all mõistetakse *p-n*-siirdega pooljuhtmaterjali, millele on antud vajatav geomeetriline vorm. Kristalli ülesandeks on anda kõik pooljuhilt nõutavad elektrilised parameetrid.

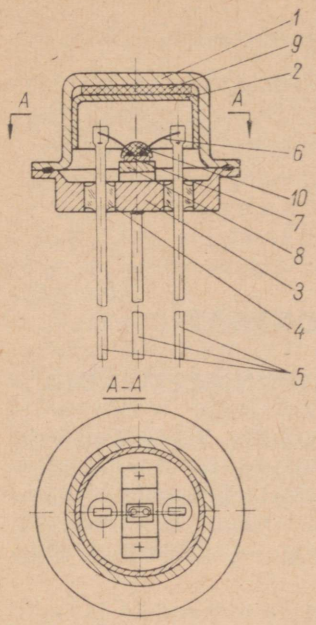
Kristalli, millele on joodetud elektroodid, nimetatakse armatuurblokiks.

Armatuurbloki väljaviikudeks kasutatakse peeneid juhtmeid, mis ühendavad armatuurbloki elektroode korpuse väljaviikudega. Neile esitatakse järgmised nõuded:

1) peavad olema head elektrijuhid;
2) ei tohi ühenduskohtades moodustada *p-n*-siirdeid;
3) peavad olema mehaaniliselt küllalt tugevad;
4) peavad olema hästi kinnitatavad ühest otsast kristalli ja teisest otsast korpuse väljaviigu külge;
5) peavad olema korrosioonikindlad.

Esitatud nõuetele vastavad ja on põhiliselt kasutusel kuld, alumiinium ja nikkel. Millist materjali toote konstruktsioonis kasutatakse, sõltub selle toote otstarbest ja koostamise tehnoloogiast.

K r i s t a l l i h o i d j a all mõistetakse armatuurbloki kinnitamiseks ettenähtud detaili. Konstruktsioonilt võib kristallihoidja olla väga mitmesugune. Tema ülesandeks on anda armatuurblokile vajalik asend korpuses. Mõnikord kasutatakse kristallihoidjat tehnoloogiliste protsesside hõlbustamiseks. Konstruktsiooni osa, mis



Joon. 89. Transistori ehitus:
1 — kübar; *2* — kinnitaja; *3* — äärik; *4* — klaasisolaator; *5* — väljaviigud; *6* — armatuurbloki väljaviik; *7* — armatuurblokk, kristall; *8* — kristallihoidja; *9* — absorbent; *10* — *p—n*-siirde kaitsematerjal

koosneb kristallihoidjale või alusele kinnitatud armatuurblokist koos väljaviikudega, nimetatakse koostatud armatuuriks.

Kristallihoidja peab:

1) hästi juhtima soojust;

2) omama pooljuhtmaterjaliga lähedast soojuspaisumistegurit;

3) ei tohi armatuurblokile avaldada mehaanilist mõju, mis vigastaks armatuurblokki;

4) olema korrosioonikindel.

Esitatud nõuetele vastab nikkel, mida kasutataksegi põhilise materjalina kristallihoidjate valmistamisel.

K o o s t a t u d a l u s koosneb koostatud armatuurist, mis on kinnitatud alusele.

Koostatud alusele esitatakse järgmised nõuded:

1) kõik kinnitused peavad olema mehaaniliselt tugevad ja hea elektrilise kontaktiga;

2) ei tohi olla selliseid mehaanilisi lisandeid, mis hiljem võivad vabaneda (näit. klaasitilgad või metallipritsmed);

3) alus peab olema korrosioonikindel;

4) pinnad peavad olema puhtad.

K o r p u s e ülesandeks on kaitsta kristalli väliskeskkonna mõjutuste eest. Pooljuhi parameetrid sõltuvad *p-n*-siirete olukorrast ja välisfaktorite mõjust. Eriti halvasti mõjuvad parameetritele veeaur ja hapnik. Korpuse esimene ülesanne ongi takistada ülearuse hapniku, veeauru ja muude kahjulike lisandite juurdevoolu *p-n*-siirdele.

Korpus:

1) peab omama küllaldast mehaanilist tugevust ja hermeetilisust;

2) ei tohi korrodeeruda;

3) peab olema võimeline juhtima soojust *p-n*-siiretelt ümbritsevasse keskkonda;

4) peab vastu pidama ettenähtud elektrilistele koormustele;

5) peab kindlustama toote kinnitamise skeemi;

6) peab olema lihtne, odav valmistada, töökindel ja mugav ekspluatatsioonis.

p-n-siirete kaitsematerjalid ja absorbendid. Korpuse hermeetilisus on suhteline mõiste. Kuna absoluutset hermeetilisust ei eksisteeri, siis teatud aja möödumisel transistori sees keskkond muutub. Kahjulikud lisandid (veeaur, hapnik jne.) võivad difundeeruda korpusesse läbi mikropragude. Selleks et pooljuhttoode säilitaks pika ea (üle 10 a.) jooksul oma parameetrid, viiakse korpusesse absorbenti ehk getterit. Absorbendi hulk arvutatakse selliselt:

1) neelatakse kõik kahjulikud lisandid, mis jäävad transistori pärast hermetiseerimist;

2) neelatakse korpuse materjalist väljadifundeeruvad gaasid;

3) neelatakse aja jooksul mikropragudest läbidifundeerunud lisandid.

Absorbent viiakse korpusesse tablettideks pressituna, pulbrina või segudena. Tabletid tuleb korpuse sees kinnitada. Pulbrilise absorbendi terakeste suurus tuleb valida selline, et nad ei purustaks oma liikumisega väljaviikusid.

Viimasel ajal viiakse absorbent transistorisse seguna. On kasutusel vaseliini ja tseoliidi segu, millega kaetakse *p-n*-siire. Räniorgaaniline vaseliin kaitseb *p-n*-siiret mehaaniliste vigastuste eest ja tseoliit absorbeerib kahjulikke gaase.

Kaitsematerjalidele esitatakse järgmised nõuded:

1) peavad kaitsma *p-n*-siiret keskkonna kahjulike mõjude eest (niiskus, hapnik);

2) ei tohi rikkuda siirete materjali. Kaitsekiht peab olema õhuke, et pooljuhtmaterjalis ei tekiks mehaanilisi pingeid;

3) ei tohi alandada pooljuhi mehaanilist vastupidavust;

4) peavad olema hermeetilised ja niiskuskindlad;

5) peavad olema adhesiivsed (kleepuvad) pooljuhi pealispinna poleeritud materjaliga;

6) peavad olema keemiliselt inertsed;

7) peavad olema suure eritakistuse ja dielektrilise läbitavusega.

8.2. TÄHTSAMAD KOOSTAMISOPERATSIOONID

Koostamise all mõistetakse rida tehnoloogilises järjekorras sooritatavaid operatsioone konstruktsioonielementide ühendamiseks kuni toote lõpliku valmimiseni. Põhilised operatsioonid on:

1) armatuurbloki kinnitamine kristallihoidjale või alusele. Selle operatsiooni läbiviimiseks sobib jootmine grafiidist, keraamikast või metallist kassettides spetsiaalse keskkonnaga (vesinik, heelium, argoon) ahjus. Joota võib ka õhu keskkonnas, kuid sel juhul tuleb kasutada kaitseräbusteid;

2) armatuurbloki väljaviikude kinnitamine armatuurbloki elektroodide külge (häälestamine). Selleks võib kasutada jootmist, sulatamist, termokompressiooni, keevitamist (näit. laserikiirega);

3) *p-n*-siirete katmine kaitsematerjaliga. See operatsioon koosneb reast alaoperatsioonidest: emaili ettevalmistamine, pealekandmine, kuivatamine jne.;

4) hermetiseeritakse tavaliselt külmkeevituse ja elektrikuumkeevitusega. Kasutatakse ka ultrahelikeevitust. Hermetiseerimise kvaliteedi hindamiseks on rida meetodeid, nagu mass-spektrometri meetod (heeliumlekiotsija) jne. Tööstuslikult on need seadmed veel kallid ja kohmakad, mistõttu hermeetilisuse kvaliteedi hindamiseks kasutatakse rohkem surveanumat, kus vedelikule antakse surve üle 12 at. Mittehermeetilised tooted prakeeritakse seejuures elektriliste parameetrite mõõtmise teel;

5) värvimine ja markeerimine.

Koostamisoperatsioonidele tulevad detailid ja sõlmed peavad vastama tööjoonistele.

Sõlmede ja detailide puhtuse tagamiseks tuleb nad vahetult enne koostamist pesta ja vajaduse korral isegi söövitada. Korpuse detailid peavad eelnevalt olema kontrollitud hermeetilisusele. Erandjuhtudel, kui korpuste hermeetilisuse praak on väike, kontrollitakse hermeetilisust juba valmis tootel.

Koostamise käigus tuleb kinni pidada hügieenireeglitest. Kätega ei tohi puudutada puhaste detailide pindu, tuleb töötada pintsettidega. Ei ole lubatud painutada klaasisolaatorist läbitulevaid väljaviikusid. Painutuse tagajärjel võivad tekkida klaasisolaatoris praod, mis hiljem suurenedes annavad klaasikilde, mis omakorda võivad purustada peened väljaviigud ja sellega põhjustada katkestusi.

8. 3. JOOTMINE

Jootmist kasutatakse kristallide kinnitamiseks kristallihoidjale (alusele või väljaviigule), väljaviikude ühendamiseks ja vahel ka korpuste hermetiseerimiseks.

Jootmiseks nimetatakse metalli või metalliseeritud detailide lahtivõetamatut ühendust joodisega — sulatatud metalli või sulamiga. Detailid kuumutatakse joodise sulamistemperatuurini, mis peab olema madalam detailide sulamistemperatuurist. Sulatatud joodis tardub jahtudes ja liidab detailid küllalt tugevalt kokku.

Jootmist kasutatakse siis, kui on vaja tagada detailide füüsikaliste omaduste muutumatus, õmbluse tihedus ja liitekoha väike elektriline takistus.

Kvaliteetsel jootmisel tuleb:

1) joodetavad detailid eelnevalt puhastada mustusest, rasvakilest ja oksiidist;

2) jootekohta kaitsta võimaliku oksüdeerumise eest kuumuta-

misel; selleks kasutatakse spetsiaalseid räbusteid või inertgaaside keskkonda;

3) tagada jootmiseks sobiv temperatuur. Mida kõrgem on jootmise temperatuur, seda paremini kattuvad joodetavad pinnad joodisega. Ülekuumutamine vähendab liite mehaanilist tugevust.

Parema elektrilise kontakti ja mehaanilise tugevuse saamiseks tuleb joota kogu pinna ulatuses. Joodis peab joodetavate materjalide kõiki pinnaosakesi hästi märgama ja joodisetilk peab sulas olekus laiali valguma üle kogu pinna, aga mitte koonduma ühte suurde tilka.

Joodisele esitatakse järgmised nõuded:

1) joodise sulamistemperatuur peab olema madalam joodetavate detailide sulamistemperatuurist;

2) joodis peab joodetavate materjalide paare hästi märgama, et tagada liitekoha tugevust ja tihedust;

3) joodis peab olema hea elektrijuht;

4) joodis peab halvasti oksüdeeruma;

5) joodise soojuspaisumistegur peab olema ligilähedane joodetavate detailide soojuspaisumistegurile.

Sõltuvalt sulamistemperatuurist jaotatakse kõik joodised madala sulamistemperatuuriga ehk pehmejoodisteks (sulamistemperatuur kuni 300° C) ja kõrge sulamistemperatuuriga ehk kõvajoodisteks (sulamistemperatuur üle 500° C).

Pehmejoodiste hulka kuuluvad tina-, plii-, vismut- ja kaadmiumjoodised. Neil joodistel on hea märgavus. Nende puuduseks on suhteliselt väike mehaaniline tugevus (50 ... 10 N/mm²) ja haprus madalatel temperatuuridel. Viimast välditakse legeerivate elementide (In, Ga) väikeste (1 ... 3%) koguste lisamisega. Töötemperatuuridel üle 100° C pehmejoodiste kasutamine ei ole enam soovitatav. Kui joodetav liide asub väliskeskkonnas, siis tuleb ta oksüdeerumise vältimiseks katta värvi või lakiga. Enamkasutatavaks pehmejoodiseks on ПОС-61 (61% tina, 39% pliid, 0,8% antimoni).

Kõvajoodiseid kasutatakse pooljuhttoodetes harva. Neid kasutatakse mõnede korpuste konstruktsioonides detailide ühendamisel. Seejuures kasutatakse põhiliselt hõbeda baasil toodetud joodiseid, vahel aga ka puhast vaske, mis on väga tugev ja mis märgab hästi niklit, terast ning keraamilisi materjale.

Kõvajoodis ПСр-45 sisaldab 45% hõbedat, 30% vaske ja 25% tsinki.

Kõvajoodis ПСр-50 sisaldab 50% hõbedat ja 50% vaske.

Joodetavad detailid, kaasa arvatud räni või germaaniumi kristallid, puhastatakse vahetult enne jootmist, kuna joodis sulas olekus musti ja rasvaseid pindu ei märga. Esiteks rasvatustatakse orgaanilise lahustajaga (atsetoon, bensiin, tetrakloorsüsinik või piiritus). Pärast seda detailid kuivatatakse.

Rasvatustamisega eemaldatakse mustus ja rasv. Kui aga joo-

detavaid pindu katab oksiidikiht, tuleb see eemaldada nõrgas happes söövitamisega. Söövitamisel tuleb eraldada ainult oksiid ja mitte söövitada põhimetalli. Ränilt eemaldatakse oksiidikiht söövitamisega fluorhappes, mis eemaldab ainult oksiidi; pärast söövitamist pestakse detailid destilleeritud vees ja kuivatatakse.

Detailide ja joodise oksüdeerumise vältimiseks kuumutamisel kasutatakse räbusteid. Räbustid soodustavad ka metalli pinna märgumist joodisega.

Räbustitele esitatakse järgmised nõuded:

1) nende sulamistemperatuur peab olema madalam joodise sulamistemperatuurist, kuid aurumistemperatuur kõrgem joodise aurumistemperatuurist;

2) nad peavad hästi lahustama oksiide või siis siduma need kergesti sulavatesse ühenditesse, mis on kergesti eraldatavad;

3) nad peavad olema pärast jootmist jootekohast kergesti eraldatavad.

Räbustid jaotatakse kaitseräbustiteks ja keemiliselt aktiivseteks räbustiteks. Kaitseräbustid (näit. kampol) kaitsevad ainult eelnevalt oksiididest puhastatud pindu oksüdeerumise eest kuumutamisel. Kaitseräbustid ei sisalda happeid ja seetõttu ei põhjusta jootekoha hilisemat oksüdeerumist.

Keemiliselt aktiivsed räbustid (näit. booraks, tsinkkloriid) puhastavad pinna oksiididest, kuid pärast jootmist kutsuvad esile korrosiooni. Seepärast on tähtis, et vahetult pärast jootmist räbusti jäägid eemaldataks. Selleks pestakse jootekohta destilleeritud vees või piirituses ja kuivatatakse.

Jootmisel kasutatakse mitmesuguseid spetsiaalseid abinõusid ja seadmeid.

Üheks abinõuks on jootmistemperatuurini kuumutatud plaat, kuhu asetatakse eelnevalt oksiidist puhastatud detailid (alused, kristallihoidjad). Jootmiseks ettenähtud kohale kantakse räbusti. Kui detail on saavutanud joodise sulamistemperatuuri, kantakse detailile joodis. Pärast seda detail jahutatakse ja pestakse. Plaadi temperatuuri reguleeritakse erilise termoregulaatori abil, mille anduriks on kontakttermomeeter.

Sageli joodetakse kristalle kristallihoidjale inertgaasilise keskkonnaga ahjus. Selle mooduse eeliseks on see, et joota saab ilma räbustita. Kristallihoidjad laotakse grafiidist, metallist või keraamikast kassetti, kuhu asetatakse ka sulamitükike ja kristall. Kristalli paigaltnihkumise vältimiseks kasutatakse piirajatega või spetsiaalsete surujatega kassette.

Ilma räbustita võib joota ka lihtsalt inertgaasilise või vesiniku keskkonnaga skafandris jootekolviga.

Väga väikeste detailide täpseks jootmiseks kasutatakse mikromanipulaatoreid, seadmeid, millega saab detailidele anda täpse asendi. Mikromanipulaatorite konstruktsioone on väga palju. Joodetavaid detaile kuumutatakse neis seadmetes kas

1) kaudse kuumutamise teel, s. o. jootekoha lähedale viiakse kuum keha (hõõgniit), mis tõstab jootekoha temperatuuri joodise sulamistemperatuurini;

2) voolumeetodil, s. o. kasutatakse ära joodetavate detailide takistus, millest voolu läbijuhtimisega saavutatakse jootmiseks vajalik temperatuur või

3) kasutatakse spetsiaalset alust, mis on kuumutatud jootmiseks vajaliku temperatuurini.

Manipulaatorite konstruktsioonid erinevad automatiseerimise ja mehhaniseerimise astmelt ja kasutatavate ülekannete poolest. Kõigi manipulaatorite ülesandeks on tagada detaili täpne liikumine. Selleks vähendatakse inimese käeliigutuse suurust 10 ... 200 korda mehaanilise, pneumaatilise, elektrilise või hüdraulilise ülekande abil.

Viimasel ajal on jootmisel hakatud kasutama ultraheli, mis võimaldab joota ilma räbustita. Ultraheli kasutatakse ka enne ja pärast jootmist detailide pesemisel ning rasvatustamisel.

8.4. KEEVITAMINE

Keevitamisel liidetakse ühendatavad metalldetailid nende kokkupuutuvate osade sulatamise teel kas põletileegis või elektrivoolu mõjul. Keevitusviisi valik sõltub liitele esitatud nõuetest ja liidetavate detailide materjalist.

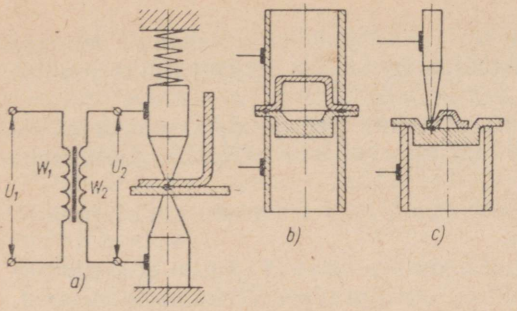
Gaasikeevitusel kasutatakse harilikult atsetüleeni- ja hapnikuleeki. Seejuures kuumutatakse detailide kokkupuutuvad osad sulamiseni gaasipõleti leegis.

Gaasikeevitusega on hõlbus ühendada niisugustest metallidest ja sulamitest detaile, millel on erinev sulamistemperatuur. Seepärast kasutatakse pooljuhtide tööstuses gaasikeevitust kõrge sulamistemperatuuriga metallidest (plaatina, volfram) detailide ühendamiseks vasest, niklist ja teistest madalama sulamistemperatuuriga metallidest detailidega. Näiteks nikkeltraadi keevitamisel volframtraadiga kuumutatakse nikkeltraadi otsa kuni sulamiseni. Sulas olekus tekib nikkeltraadi otsa kuulike ja volframtraat pistetakse sinna sisse.

Gaasileeki kasutatakse ka lihtsalt kuulikeste valmistamisel traadi otstesse, näiteks kuldtraadi otsa enne häälestamist jne.

Üldiselt kasutatakse gaasikeevitust pooljuhtide tööstuses harva.

Elektriline punktkeevitus põhineb elektrivoolu soojuslikul toimel. Keha piirkonnad, kus takistus on suurem, kuumenevad rohkem kui väikese takistusega piirkonnad. Sellest järeldub, et keevitatavad materjalid peavad olema halvema juhtivusega (suurema takistusega) kui keevituselektroodid. Keevitusprotsess ise toimub järgmiselt. Hea juhtivusega vasest või hõbedast elektroodidega surutakse keevitatavad detailid teineteise vastu. Siis



Joon. 90. Elektrilise punktkeevituse skeem:
a — punktkeevituse skeem;
b — torukujulised elektroodid korpuste hermetiseerimisel;
c — elektroodid kristallihoidja keevitamisel alusele

lülitatakse ahelasse vool. Vool läbib algul kokkusurutud detailide pinnakonaruste üksikuid tippe. Nende suure elektrilise takistuse tõttu kuumeneb materjal kuni sulamiseni. Mehaanilise surve tagajärjel saavutatakse kontakt kogu elektroodidealuses pinnas. Vool lülitatakse ahelasse väga lühikeseks ajaks (0,02 ... 0,2 s). Aeg reguleeritakse selliselt, et metall jõuaks elektroodialuses osas sulada. Selliselt on kuumenemisel ainult kohalik iseloom ja detailid ei kuumene üle.

Joonisel 90 *a, b* ja *c* on toodud elektrilise punktkeevituse skeem, kus on ka näidatud elektroodide mitmesuguseid võimalikke kujusid. Tabelis 4 on toodud punktkeevitusseadmete iseloomustus.

Tabel 4

Punktkeevitusseadmete tehniline iseloomustus

Iseloomustussuurus	Keevituspink koos montaažilauaga M 020.003.	Keevituspink MTП-75	Kondensaatorkeevituspink
Trafo võimsus kVA	2,2	75	2,2
Sekundaarmähise pinge U_2 V	5	3 ... 6	5
Keevitusaeg s	0,02	—	—
Keevitusvoolu tugevuse reguleerimise astmete arv	23	8	—
Surve elektroodidele N	20 ... 180	2900 ... 5000	20 ... 180
Kondensaatorite pinge reguleerimine, V	—	—	0 ... 300
Kondensaatorite mahtuvuse reguleerimine, µF	—	—	10 ... 300
Elektroodide käik mm	20	40	20

Trafo sekundaarmähis, mille keerdude arv w_2 on väike, on ühendatud elektroodide külge. Lühiajaliselt antakse vool pingega U_1 primaarmähisesse keerdude arvuga w_1, mille abil indutseeritakse sekundaarmähises keevituseks vajalik pinge

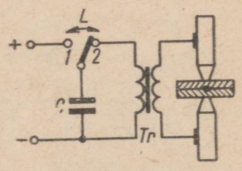
$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1.$$

Keevituseks vajalik surve elektroodidele saadakse vedru abil, pneumaatiliselt või muul viisil. Surve peab olema reguleeritav vastavalt vajadusele. Tiheda keevisõmbluse tagamiseks on vajalik, et kontakt detailiga tekiks kogu elektroodi kontaktipinna ulatuses. Eri kujuga elektroodid ja erineva paksusega materjalid vajavad erinevaid surveid.

Suuremate võimsuste korral kuumenevad ka elektroodid. Nende jahutamiseks kasutatakse erivõtteid. Lihtsam on vesijahutuse kasutamine, eriti seest õõnsate elektroodide korral.

Õhukeste ja väikesemõõtmeliste detailide keevitamisel ei saa punktkeevitust kasutada detailide võimaliku läbipõlemise ja kõmmeldumise tõttu. Niisugustel juhtudel kasutatakse uuemat punktkeevituse moodust — elektrilist kondensaatorkeevitust. Viimane erineb tavalisest punktkeevitusest selle poolest, et iga punkti keevitamiseks kasutatav energia doseeritakse kondensaatoriga. Seega saab keevitusrežiimi täpsemalt määrata. Keevitatavate detailide minimaalseks paksuseks on 0,05 mm. Kondensaatorkeevitus (joon. 91) võimaldab keevitada ka erineva paksusega detaile.

Kondensaator C laetakse alaldist (lüliti L on ühendatud klemmiga *1*). Laadimine toimub väga kiiresti, mõne mikrosekundi jooksul. Keevitus toimub peaaegu ühtlase vooluga (lüliti L on viidud kokku klemmiga *2* läbi trafo Tr primaarmähise). Edasi toimub kõik nii nagu tavalisel punktkeevitusel.



Joon. 91. Kondensaatorkeevituse skeem

Keevituse kvaliteet oleneb režiimist. Režiimi all mõistetakse keevitusvoolu tugevust, elektroodide survet, elektroodi kontakti suurust, keevituse kestust, keevitatavate detailide pinna olukorda.

Keevitusvoolu tugevus peab olema optimaalne. Juhul kui vool on väike, ei kuumene detailid küllaldaselt ja liide jääb nõrgaks. Kui aga vool on liiga suur, eraldub liiga palju soojust ja võib tekkida metalli ülekuumenemine ning laialipritsimine.

Suurt tähtsust omab ka keevituse kestus. Vahetult pärast voolu sisselülitamist hakkavad metallist detailid kuumenema. Keevituse kestus peab olema selline, et keevituse kohas detailid sulavad, kuid ei teki metallipritsmeid ülekuumenemise tõttu. Kui voolu väljalülitus jääb hiljaks, hakkab sulametall elektroodide alt välja

voolama, tekivad praod ja metallipritsmed ning ei saada tugevat liidet.

Keevitatavate detailide pinnad peavad olema ühtlaselt töödeldud, vastasel juhul tekib keevitamisel lokaalselt intensiivne voolutihedus ja tekivad samad nähtused mis tugeva keevitusvoolu või pika keevitusaja korral.

Keevituse kvaliteeti hinnatakse liite tugevuse ja välisilme järgi. Tugevust hinnatakse tõmbekatsega, välisilme kontrollimisel aga ei tohi esineda metallipritsmeid.

Tavaliselt keevitatakse seeriaviisiliselt toodetavatel keevituspinkidel (tabel 4). Tabelis toodud andmed annavad ettekujutuse üksikute režiimielementide suurusjärkudest.

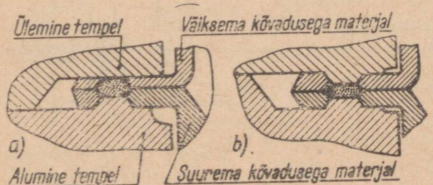
8.5. KÜLMKEEVITUS

Külmkeevituse all mõistetakse kahe metalli ühendamist suure surve all. Tugev surve põhjustab kahe erineva metalli aatomite lähendamist üksteisele sellise kauguseni, et nende vahel tekib aatomside.

Külmkeevituse peamiseks tingimuseks on liidetavate detailide pindade puhtus ja vajalik surve.

Külmkeevitusega võib liita selliseid metalle, nagu vask, nikkel, alumiinium, pehme teras, kovar jt., kuid ka erinevaid metallipaare, nagu vask ja kovar, teras ja vask, vask ja alumiinium jne.

Külmkeevitust kasutatakse korpuse hermetiseerimiseks ja teostatakse spetsiaalsete külmkeevituspressvormidega. Pressvormide



Joon. 92. Külmkeevituse viisid:
a — ühepoolne külmkeevitus erineva kõvadusega materjalide keevitamiseks;
b — kahepoolne külmkeevitus ühesuguse kõvadusega materjalide keevitamiseks

templitele ja matriitsidele on antud detailidele surve avaldamiseks spetsiaalne kuju. Templite kuju järgi liigitatakse keevisõmblused ühepoolseteks ja kahepoolseteks (joon. 92). Ühepoolset keevisõmblust kasutatakse erinevatest metallidest detailide keevitamisel. Ühepoolse keevitusega on võimalik tagada mõlema detaili ühtlane deformeerumine suure surve all.

Praktiliselt on välja kujunenud, et keevitamiseks vajalik surve on küllaldane, kui materjalid on deformeerunud üle 70%. Deformatsiooniaste K leitakse valemiga

$$K = \frac{T - t}{T} 100,$$

kus T on detailide esialgne summaarne paksus;

t — keevisõmbluse paksus.

Kui deformatsiooniaste $K = 80\%$, siis liite tugevus suureneb, kui aga suurendada deformatsiooniastet K 90 protsendini, siis liide jällegi nõrgeneb, sest materjal deformeeritakse väga õhukeseks.

Külmkeevitus viiakse läbi külmkeevituspressidel. Tavaliselt kasutatakse hüdraulilisi presse. Press peab tagama vajaliku survejõu ja täpsuse, mis keevisõmblusele esitatakse.

Pressid on tavaliselt varustatud skafandritega, mille all tekitatakse mikrokliima, mis ei kahjusta *p-n*-siirdeid. Põhiliselt iseloomustab kliimat niiskuseprotsent, mis ei tohi ületada 10% (tavaline välisõhu niiskus on 60 ... 80%).

Külmkeevitatavad detailid peavad olema puhtad oksiidist ja rasvast. Rasva eraldamiseks pestakse detaile orgaanilistes lahustites ja seejärel kuivatatakse termostaatides. Oksiidi eraldamiseks tuleb detaile enne keevitamist söövitada. Seda operatsiooni on aga raske teostada, sest kuivamisel detailid oksüdeeruvad uuesti. Oksüdeerumise vältimiseks kaetakse detailid eelnevalt raskesti oksüdeeruva pinnakattega (tavaliselt nikeldatakse). Keevitamisel pinnakate puruneb ja põhimetallid moodustavad keevisliite.

8. 6. TERMOKOMPRESSIOON

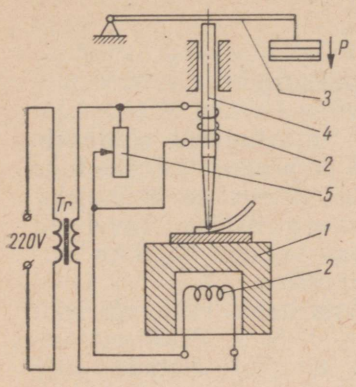
Termokompressioon on metalli ühendamise viis pooljuhtmaterjaliga surve all kõrgendatud temperatuuril. Termokompressiooni puhul materjalid ei difundeeru ega sula. Surve all viiakse siledad pinnad teineteisele nii lähedale, et hakkavad mõjuma adhesioonijõud. Kogu termokompressiooniprotsess määratakse kolme parameetriga:

1) temperatuur peab olema madalam ühendatavate materjalide eutektikumi temperatuurist ja dislokatsioonide tekkimise temperatuurist;

2) surve peab olema nii suur, et ühendatav metalltraat surutakse kokku surve suunas 30 ... 80%;

3) protsessi kestus on sõltuvalt temperatuurist ja survest mõni sekund kuni mõni tund. Protsessi kestusele avaldavad mõju ühendatavate materjalide pinnaiseloom ja keskkond, milles protsess toimub.

Termokompressiooni suureks eeliseks on see, et suhteliselt madala temperatuuriga ning ilma räbustite ja muude vahenditeta säilitatakse *p-n*-siire ja hea elektriline kontakt pooljuhtmaterjali ja väljaviigu vahel. Väljaviikusid saab ühendada suure täpsusega ja ei purustata pooljuhtmaterjali pinda. Meetod ise on lihtne ja



Joon. 93. Termokompressiooniseadme skeem

kergesti mehhaniseeritav. Puuduseks on väike tootlikkus ja väike mehaaniline tugevus, võrreldes keevituse või jootmisega.

Termokompressiooni kasutatakse metalltraadist (põhiliselt kuld ja alumiinium) 200 ... 300 μm läbimõõduga väljaviikude ühendamiseks räni-kristalliga.

Termokompressioon teostatakse spetsiaalsetel seadmetel — manipulaatoritel. Joonisel 93 on toodud manipulaatori põhimõtteline skeem. Ülemist *4* ja alumist *1* elektroodi kuumutatakse küttespiraalide *2* abil termokompressiooniks vajaliku temperatuurini. Alumine elektrood ja väljaviigutraadi pintsetid on manipulaatoriga nihutatavad. Ülemine elektrood saab kangi *3* abil vajaliku surve, mida on võimalik reguleerida raskusega *P*.

Termokompressioonil saadava liite tugevust hinnatakse tõmbekatsega.

8.7. *p-n*-SIIRETE KAITSMINE

p-n-siirde kaitseks kasutatavad lakid, emailid, kompaundid, räniorgaaniline vaseliin või selle segu tseoliidiga kantakse *p-n*-siirdele põhiliselt pritsi või nõelaga. Erikonstruktsioonides kantakse kaitsematerjal *p-n*-siirdele ka sissekastmise teel.

Laki, emaili või kompaundiga katmisel peab kattekiht võimalikult õhuke olema, et hiljem ei tekiks *p-n*-siirdes temperatuuri muutumisel pingeid. Pärast katmist laki, emaili või kompaundiga lähevad kristallid kuivatamisele. Vaseliini ja tseoliidi seguga kaetakse aga juba koostatud alused vahetult enne hermetiseerimist. Katmine toimub spetsiaalses alla 5% niiskust sisaldavas skafandris, et tseoliit ei märguks. Vaseliiniga katmisel ei oma doosi suurus erilist tähtsust, põhiline nõue on, et siire oleks kaetud ja et vaseliin ei satuks keevitatavale pinnale.

p-n-siirete kaitseks vajaliku keskkonna saamiseks korpuses on ette nähtud pulbriline tseoliit, mis viiakse pooljuhttootesse kindlas ettenähtud annuses vahetult enne hermetiseerimist kas käsi- või automaatdosaatoriga. Protsess toimub kuiva keskkonnaga skafandris.

9. POOLJUHTSEADISTE PARAMEETRID JA NENDE MÕÕTMINE

9.1. PARAMEETRITE MÕÕTEAPARATUUR

Blokid alalisvoolurežiimide andmiseks. Transistoride parameetrite mõõtmisel tuleb anda siiretele tehnilistes tingimustes ettenähtud pinged ja voolud. Transistoride parameetrite mõõteseadmed saavad toitepinge üldkasutatavast elektrivõrgust. Selle võrgu pinge aga sõltub antud ajamomendil võrku lülitatud tarbijate võimsusest ja võib kõikuda piirides 198 V kuni 242 V. Transistoride režiimid aga tuleb ette anda suure täpsusega ($\pm 1{,}5\%$). Seepärast kasutatakse transistoride alalisvoolurežiimide andmiseks stabilisaatoreid, s. t. seadmeid, mille väljundpinge on ajaliselt stabiilne. Joonisel 94 on toodud tüüpiline toitebloki lahterskeem.

Trafo muudab primaarmähisele antud võrgupinge alaldi toitmiseks vajaliku suurusega pingeks. Alaldi kindlustab stabilisaatorile vajalikud alaldatud toitepinged. Stabilisaator annab ajaliselt muutumatu (stabiilse) pinge või voolu.

Joon. 94. Transistoride mõõteseadme toitebloki lahterskeem

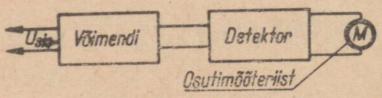
Vahelduvpingegeneraator. Transistori parameetrite mõõtmisel tuleb transistori elektroodidele anda nõutud amplituudi ja sagedusega vahelduvpinge. Selle vahelduvpinge saamiseks kasutatakse vahelduvpingegeneraatoreid. Need generaatorid on ehitatud elektronlampidel või transistoridel. Generaator peab andma ajaliselt püsiva amplituudi ja sagedusega väljundpinget, mis ei tohi sõltuda toitepinge kõikumisest. Tüüpilised generaatorite sagedused transistoride mõõtmisel on 270 Hz, 980 Hz, 1 MHz, 5 MHz ja 20 MHz.

Elektronvoltmeeter. Transistori parameetrite üle otsustatakse mõõtetakistil tekkiva pingelangu järgi. Seda pinget mõõ-

detakse elektronvoltmeetriga. Kui tegemist on vahelduvpinge või impulsspingete mõõtmisega, alaldatakse võimendi väljundist saadav vahelduvpinge detektori abil ja mõõdetakse magnetoelektrilise osutimõõteriistaga. Tüüpilised elektronvoltmeetrite lahterskeemid on toodud joonistel 95 ja 96.

Pooljuhtseadiste parameetrite mõõteseadmete ehitus. Vastavalt mõõdetavale parameetrile kasutatakse toiterežiimide andmiseks vajalikke blokke, generaatorit, võimendit

Joon. 95. Elektronvoltmeetri lahterskeem



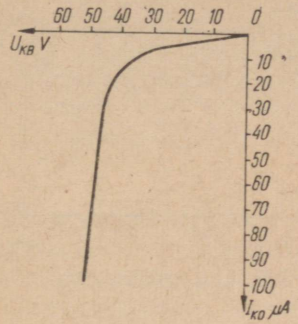
Joon. 96. Detektoriga elektronvoltmeetri lahterskeem

jne. Need seadmed on paigutatud kahele poole mõõtelauda plekkkassettidesse. Seadmete parameetrite muutmiseks ja reguleerimiseks vajalikud nupud on paigutatud nende esiplaadile või laua ülaplaadile. Vajalikud kommutatsioonielemendid ja mõõteahelad on paigutatud mõõtelaua plaadi alla. Vahelduvvoolutoidet saab mõõteriist vahelduvvooluvõrku lülitatud trafost, mis on paigutatud külgkassetti. Mõõtelaua plaadile on monteeritud osutimõõteriist, mis on gradueeritud mõõdetava parameetri väärtustesse.

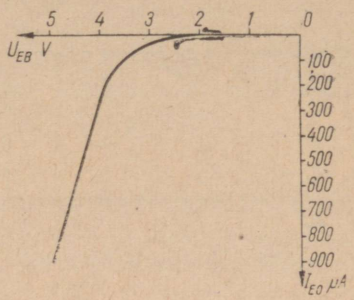
9.2. TRANSISTORI ALALISVOOLUPARAMEETRID

Transistori pinge-voolu tunnusjooned. Graafikuid, mis iseloomustavad transistori elektroodidele rakendatud pingete ja tekkivate voolude vahelisi sõltuvusi, nimetatakse transistori pinge-voolu tunnusjoonteks. Transistoride alalisvooluparameetrite mõõtmisel pakuvad huvi kollektor- ja emittersiirde pinge-voolu tunnusjooned, mis on toodud joonistel 97 ja 98. Kollektor- ja emittersiirde pinge-voolu tunnusjooned määratakse joonistel 99 ja 100 kujutatud skeemide abil. Siirded on siin vastupingestatud. Mõõdetakse vastuvoolude muutumist sõltuvalt vastupinge suurusest. Mõõtmise tulemused kantakse punktidena koordinaatteljestikku ja punktid ühendatakse pideva joonega. Nii saadaksegi siirete pinge-voolu tunnusjooned. Transistori kollektor- ja emittersiirde vastuvoole tähistatakse vastavalt I_{K0} ja I_{E0}. Vastupingete polaarsused on joonistel antud *p-n-p*-tüüpi transistoride mõõtmiseks; *n-p-n*-tüüpi transistoride mõõtmiseks tuleb polaarsused vahetada.

Vastuvoolude I_{K0} ja I_{E0} mõõtmine. Transistoride tootmisel oleks kõikide transistoride pinge-voolu tunnusjoonte üles-



Joon. 97. Kollektorsiirde pinge-voolu tunnusjoon

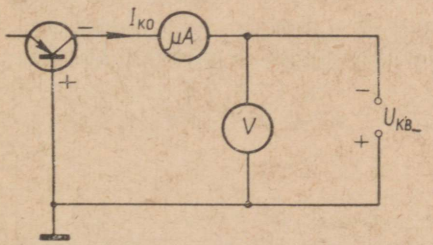


Joon. 98. Emittersiirde pinge-voolu tunnusjoon

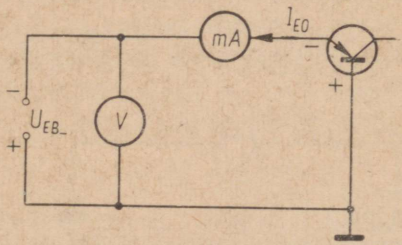
võtmine liialt töömahukas. Seepärast mõõdetakse vastuvoolusid ainult ühe kindla etteantud pinge juures. Kui transistori vastuvool on väiksem normides etteantust, on transistor kõlblik, kui suurem, siis praak. Vastuvoolu I_{KO} mõõdetakse joonisel 99 toodud skeemi järgi, vastuvoolu I_{EO} aga joonisel 100 toodud skeemi järgi.

Algvoolu I_{Ka} mõõtmine. Algvool I_{Ka} on vool suletud kollektorsiirde korral kollektori ja emitteri ahelas, kusjuures emitteri-baasi vahele on lülitatud takisti R_B. I_{Ka} mõõteskeem on toodud joonisel 101. Algvool I_{Ka} on suurem kui vastuvool I_{KO}.

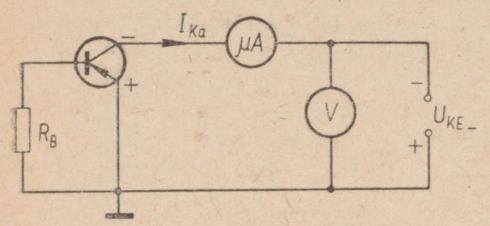
Emitter-baas-siirde vastupinge U_{EO} mõõtmine. Joonisel 99 on näha, et alates teatud pingest kasvab emittersiirde vastuvool väga järsult, s. o. siirdele antava pinge väga väike muutus kutsub esile suure voolumuutuse. Tehniliselt on raske hoida siirdele antavat pinget väga täpselt konstantsena. Seepärast toi-



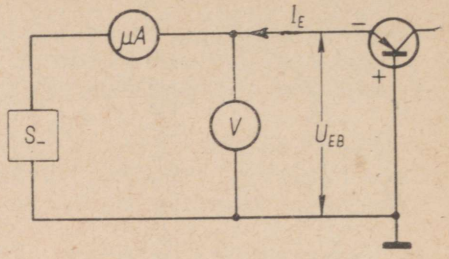
Joon. 99. Skeem kollektorsiirde pinge-voolu tunnusjoone ülesvõtmiseks



Joon. 100. Skeem emittersiirde pinge-voolu tunnusjoone ülesvõtmiseks



Joon. 101. I_{Ka} mõõteskeem



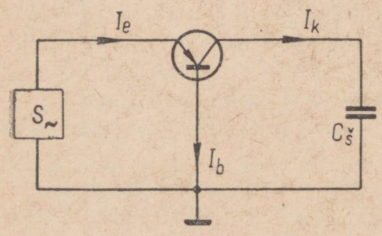
Joon. 102. U_{E0} mõõteskeem

mitakse teisiti. Voolustabilisaatori abil antakse ette siiret läbiv vool ja elektronvoltmeetriga mõõdetakse tekkiv pinge U_{E0} (joon. 102).

Kui mõõdetud U_{E0} on suurem etteantud normist, on transistor kõlblik, kui väiksem, siis praak.

9. 3. TRANSISTORI MADALSAGEDUSPARAMEETRID

Transistoride üheks kasutusalaks on nõrkade signaalide võimendamine. Võimendusrežiimis antakse transistorile vajalik kollektoripinge ja emitterivool, mis määravad transistori tööpunkti. Lisaks tööpunkti määravale alalispingele ja -voolule antakse transistori sisendelektroodile võimendatav vahelduvsignaal ja väljundklemmilt saadakse võimendatud vahelduvsignaal. Transistori võib lülitada skeemi kolme põhilülituse järgi: ühise baasiga, ühise emitteriga või ühise kollektoriga lülituses. Transistori madalsagedusparameetreid mõõdetakse ühise baasiga lülituses. Siinjuures peavad elektroodidele antud vahelduvsignaalid olema palju kordi väiksemad vastavatest tööpunkti määravatest alalispingetest ja -vooludest. Transistori parameetrite mõõtmisel loetakse signaal küllalt väikeseks, kui tema amplituudi kahekordne suurendamine ei põhjusta mõõdetava parameetri muutumist rohkem kui $\pm 5\%$ (nõrga signaali tingimus). Transistori omadusi võib iseloomustada mitmesuguste parameetrite süsteemidega. Vastavalt kehtiva-



Joon. 103. h_{11} mõõteskeemi vahelduvvooluosa

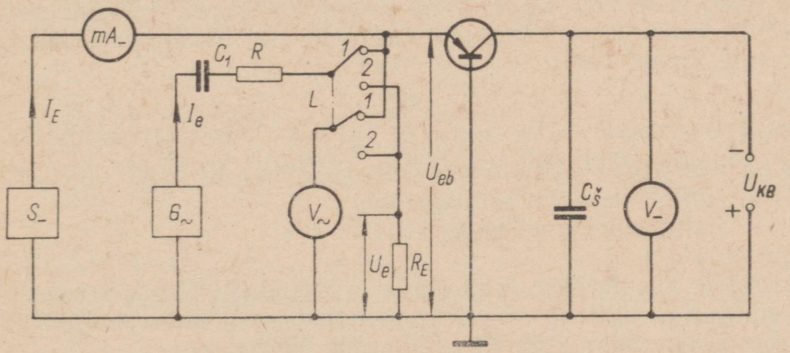
tele eeskirjadele peavad valmistajatehased esitama madalatel sagedustel transistoride kohta h-parameetrite väärtused. Soovitatav sagedus madalsagedusparameetrite mõõtmiseks on 270 Hz. Järgnevalt toodud skeemid on ette nähtud p-n-p-tüüpi transistoride h-parameetrite mõõtmiseks. n-p-n-tüüpi transistoride mõõtmisel tuleb muuta pingete ja voolude polaarsus vastupidiseks.

Transistori sisendtakistuse h_{11} mõõtmine. Transistori sisendtakistus määratakse sisendile antud vahelduvpinge ja vahelduvvoolu suhtena nõrga signaali režiimis, kusjuures väljundahel on vahelduvvoolule kondensaatoriga $C_š$ lühistatud (joon. 103). Joonisel on näidatud ainult transistori vahelduvvooluahelad. Transistori sisendtakistus [1]

$$h_{11} = \frac{U_{eb}}{I_e},$$

kus h_{11} on transistori sisendtakistus ühise baasiga lülituses,
U_{eb} — emittersiirdele langev vahelduvpinge,
I_e — emitteriahela vahelduvvool.

h_{11} mõõtühikuks on oom (Ω). Tavaliselt $h_{11} = 10 \ldots 30$ Ω. Parameetrit h_{11} mõõdetakse joonisel 104 toodud skeemi järgi.



Joon. 104. h_{11} mõõteskeem

Joonistel on kasutatud järgmisi tähiseid [2]: S_- — alalisvoolustabilisaator; $G_\sim$ — vahelduvpingegeneraator; V_- — alalispingevoltmeeter; mA_- — alalisvoolu-milliampermeeter; $V_\sim$ — vahelduvpinge-elektronvoltmeeter; V_{imp} — impulsspinge-elektronvoltmeeter.

---

[1] Siin ja edaspidi on tähistatud transistori tööpunkti pingete ja voolude indeksid suure tähega (U_E, I_E) ja vahelduvsignaalide indeksid väikese tähega (U_e, I_e).

[2] Sirge joon tähise kõrval tähendab alalisvoolu ja laineline joon vahelduvvoolu.

Kalibreerimiseks lülitatakse lüliti L asendisse *2* ja mõõdetakse elektronvoltmeetriga vahelduvpinget takistil R_E. Vool läbi takisti R_E võrdub:

$$I_e = \frac{U_e}{R_E},$$

kus U_e on vahelduvpinge takistil R_E.

Mõõtmiseks lülitatakse lüliti L asendisse *1*. Nõutakse, et $R \gg R_E$. Sel juhul emitteriahela vahelduvvool I_e lüliti L ümberlülitamisel ei muutu. Elektronvoltmeetriga mõõdetakse emittersiirdele langevat vahelduvpinget.

Sisendtakistus

$$h_{11} = \frac{U_{eb}}{I_e} = U_{eb}\frac{R_E}{U_e}.$$

Et R_E on mõõtmise käigus muutumatu suurus ja U_e seatakse kalibreerimisel alati samale väärtusele, siis on pinge U_{eb} võrdeline transistori sisendtakistusega h_{11}. Järelikult võib vahelduvpingevoltmeetri $V_{\sim}$ gradueerida h_{11} väärtuste järgi.

Vooluvõimendustegurite α ja β mõõtmine. Transistori vooluvõimendustegur ühise baasiga lülituses on kollektori ja emitteri vahelduvvoolude suhe väljundahela lühistamisel vahelduvvoolule (joon. 103):

$$\alpha = \frac{I_k}{I_e},$$

kus α on transistori vooluvõimendustegur ühise baasiga lülituses,
I_k — kollektoriahela vahelduvvool,
I_e — emitteriahela vahelduvvool.

Siinjuures $\alpha < 1$.

Praktikas kasutatakse transistore võimendusrežiimis enamasti ühise emitteriga lülituses. Vooluvõimendustegurit ühise emitteriga lülituses tähistatakse β-ga ja ta avaldub järgmiselt:

$$\beta = \frac{I_k}{I_b},$$

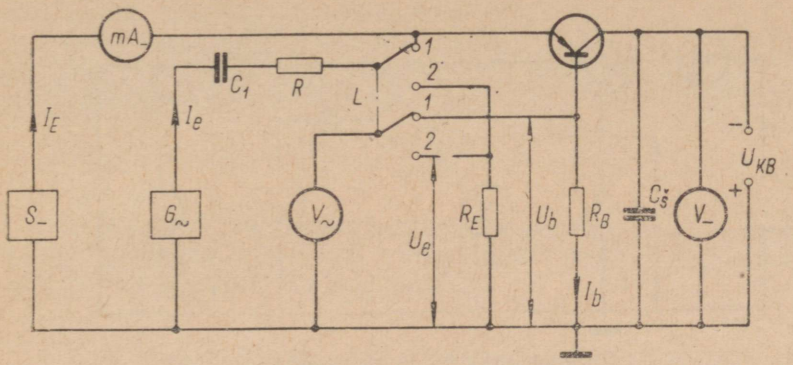
kus I_k on kollektoriahela vahelduvvool,
I_b — baasiahela vahelduvvool.

Tavaliselt transistori $\beta = 10 \ldots 600$.

Nii α kui β on voolude suhted ja seega ühikuta suurused. Madalatel sagedustel on α ja β omavahel seotud järgmiselt:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}; \quad \alpha = \frac{\beta}{1+\beta}.$$

Transistoride iseloomustamiseks kasutatakse enamasti β väärtust, mida mõõdetakse joonisel 105 toodud skeemi abil. Skeemil takistab kondensaator C_1 emitterivoolu alaliskomponendi I_e pää-



Joon. 105. β mõõteskeem

semist generaatorile, kondensaatori C_s abil lühistatakse väljundahel, takisti $R \gg h_{11}$ ja $R \gg R_e$. Kalibreerimiseks asetatakse lüliti L asendisse *2* ja mõõdetakse elektronvoltmeetriga pinge U_e takistil R_E. Selle mõõtmise tulemusena saab leida emitterivoolu vahelduvkomponendi järgmiselt:

$$I_e = \frac{U_e}{R_E}.$$

Mõõtmiseks asetatakse lüliti L asendisse *1*. Elektronvoltmeetriga mõõdetakse pinge U_b baasitakistil R_b. Siit saab leida baasivoolu

$$I_b = \frac{U_b}{R_b}.$$

Rakendades Kirchhoffi I seadust, saame:

$$I_e = I_k + I_b \quad \text{ehk} \quad I_k = I_e - I_b.$$

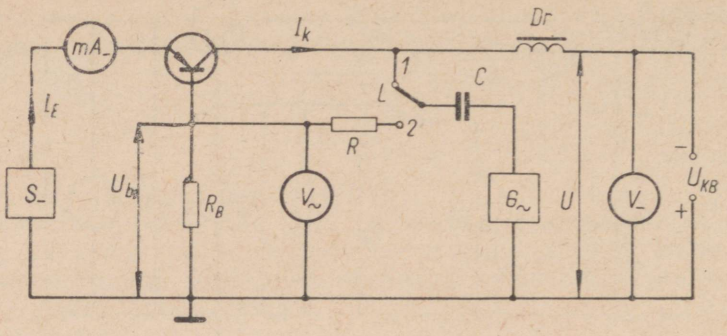
Eelneva kahe mõõtmise alusel saab avaldada transistori vooluvõimendusteguri β, kui asendada kollektorivool emitteri- ja baasivoolu vahega:

$$\beta = \frac{I_k}{I_b} = \frac{I_e - I_b}{I_b} = \frac{I_e}{I_b} - 1.$$

Asetades valemisse mõõdetud voolude väärtused, saame:

$$\beta = \frac{I_e}{I_b} - 1 = \frac{U_e R_B}{R_E U_b} - 1.$$

Kuna $\frac{U_e R_b}{R_E}$ on konstantne suurus, siis on β ligikaudu pöördvõrdeline baasitakistil tekkiva pingega U_b ja elektronvoltmeetri



Joon. 106. h_{22} mõõteskeem

skaala võib gradueerida β-ühikutes. β skaala saadakse pöördvõrdeline, s. t. väiksemad väärtused asuvad skaala lõpus.

Väljundjuhtivuse h_{22} mõõtmine. Transistori väljundjuhtivus on väljundahela vahelduvvoolu suhe väljundi vahelduvpingesse:

$$h_{22} = \frac{I_k}{U_{kb}},$$

kus h_{22} on väljundjuhtivus ühise baasiga lülituses,
I_k — kollektoriahela vahelduvvool,
U_{kb} — kollektorsiirdele langev vahelduvpinge.

Parameetril h_{22} on juhtivuse dimensioon ja tema mõõtühikuks on siimens (S).

Väljundjuhtivuse väärtused on $(0{,}2 \ldots 10) \cdot 10^{-6}$ S. Joonisel 106 on toodud h_{22}-parameetri mõõteskeem. Kondensaator C takistab kollektori alalispinge pääsemist generaatorile, drossel Dr takistab vahelduvpinge lühistumist läbi kollektoripingeallika. Siinjuures $R \gg R_B$. Kalibeeritakse lüliti L asendis *2*. Pinge baasitakistil kalibreerimise ajal

$$U_{b1} = U \frac{R_B}{R},$$

kus U on generaatori väljundpinge,
R — kalibreerimistakistus,
R_B — baasitakistus.

Mõõtmiseks lülitatakse lüliti L asendisse *1*. Vool läbi kollektoriahela on võrdne vooluga läbi baasitakisti:

$$I_k = I_b = \frac{U_{b2}}{R_B},$$

kus I_k on kollektoriahela vahelduvvool,
I_b — baasiahela vahelduvvool,
U_{b2} — vahelduvpinge baasitakistil mõõtmise ajal.
Transistori väljundjuhtivus

$$h_{22} = \frac{I_k}{U} = \frac{R_B U_{b2}}{U_{b1} R R_B} = U_{b2} \frac{1}{U_{b1} R}.$$

Et U_{b1} ja R on mõõtmiste käigus konstantsed, on mõõdetav pinge võrdeline transistori väljundjuhtivusega h_{22} ja lampvoltmeetri võib gradueerida h_{22}-ühikutes.

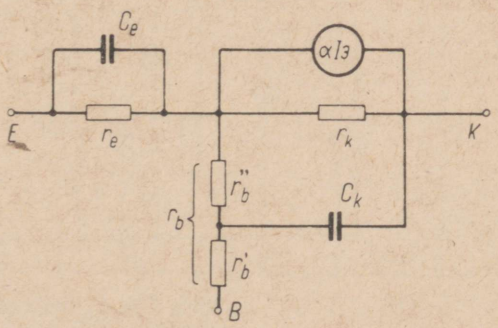
9.4. TRANSISTORI KÕRGSAGEDUSPARAMEETRID

Transistori aseskeem kõrgetel sagedustel. Kõrgetel sagedustel hakkavad transistori omadusi mõjutama siirete mahtuvused. Ülevaatlikkuse eesmärgil asendatakse arvutustes reaalne transistor ekvivalentse takistustest ja kondensaatoritest koosneva aseskeemiga. Joonisel 107 kujutatud aseskeemil on C_e emittersiirde mahtuvus, C_k — kollektorsiirde mahtuvus, r_e, r_b, r_k — emitteri-, baasi- ja kollektoritakistus.

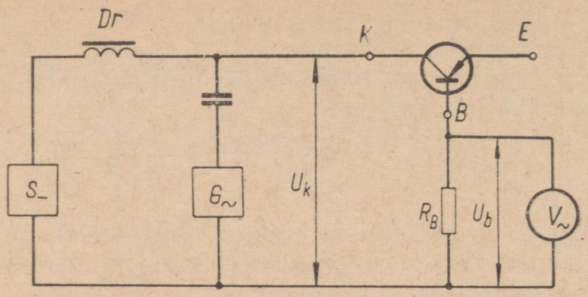
Et oleks võimalik arvestada transistori C_e ja C_k mõju projekteeritava skeemi tööle, on transistore tootval tehasel vaja neid mõõta. Peale nende parameetrite mõõdetakse veel parameetrite $r'_b C_k$ korrutist. Korrutist $r'_b C_k$ nimetatakse tagasisidestusahela ajakonstandiks.

Kollektorsiirde mahtuvuse C_k mõõtmine. C_k mõõtmisel kasutatakse asendusmeetodit. Kollektorsiire vastupingestatakse (joon. 108).

Enne mõõtmist kalibreeritakse mõõteriist. Selleks asetatakse transistori asemel mõõtepessa kollektori ja emitteri klemmide vahele väline mahtuvus, mille suurus on võrdne mõõtepiirkonna maksimaalse väärtusega. Voltmeeter peab näitama siinjuures täishälvet. Matemaatiliselt saab näidata, et $C_k = KU_b$. Järelikult võib



Joon. 107. Transistori aseskeem



Joon. 108. C_k mõõteskeem

voltmeetri skaala gradueerida otseselt C_k väärtustes. Drossel *Dr* takistab kõrgsagedusvoolu pääsemist kollektoripinge stabilisaatorisse.

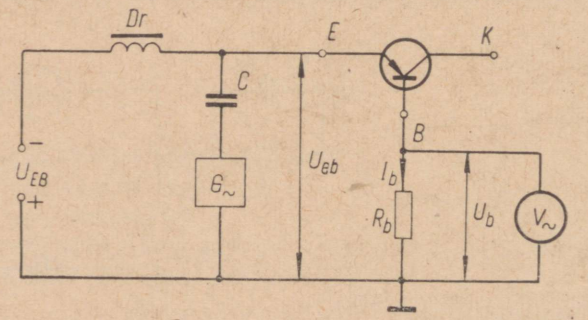
Emittersiirde mahtuvuse C_e mõõtmine. C_e mõõtmisel emittersiire vastupingestatakse (joon. 109).

Mõõtmine on analoogiline C_k mõõtmisega.

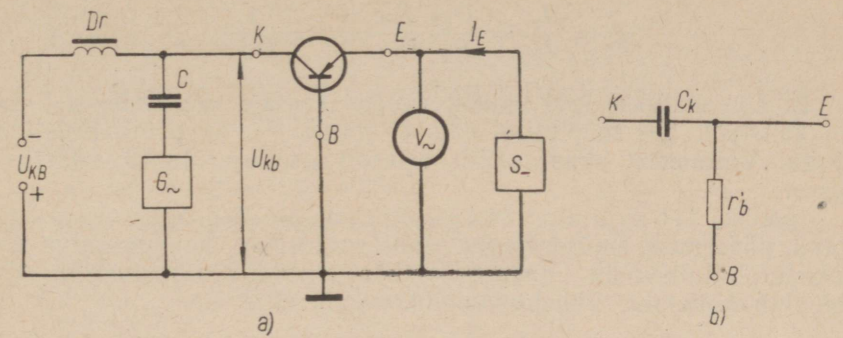
Tagasisideahela ajakonstandi r'_bC_k mõõtmine. r'_bC_k mõõtmisel on antud transistori kollektorile pinge U_{KB} ja läbi transistori voolab vool I_E (joon. 110).

Mõõteriista kalibreerimisel asetatakse transistori asemele kalibreerimisahel r'_bC_k (joon. 110, *b*), mille korrutise väärtus peab vastama mõõtepiirkonna maksimaalsele väärtusele. Transistori asetamisel mõõtepesasse on voltmeetri näit võrdeline korrutisega r'_bC_k. Voltmeetri skaala võib gradueerida r'_bC_k väärtustes. Siinjuures r'_b mõõdetakse oomides, C_k pikofaradites.

Vooluvõimendusteguri mooduli β mõõtmine. Laengukandjad liiguvad pooljuhis lõpliku kiirusega. Väga kõrgetel sagedustel hakkab laengukandjate piiratud liikumiskiiruse tule-



Joon. 109. C_e mõõteskeem



Joon. 110. $r'_b C_k$ mõõteskeem

musena vooluvõimendustegur langema. Et iseloomustada transistori võimet võimendada kõrgetel sagedustel, mõõdetakse vooluvõimendusteguri moodulit (tavaliselt sagedusel 20 MHz). Mõõtmine toimub vastavalt joonisel 111 toodud skeemile.

Kalibreeritakse lüliti asendis *2*. Emitteri vahelduvvool

$$I_e = \frac{U_{b2}}{R_B},$$

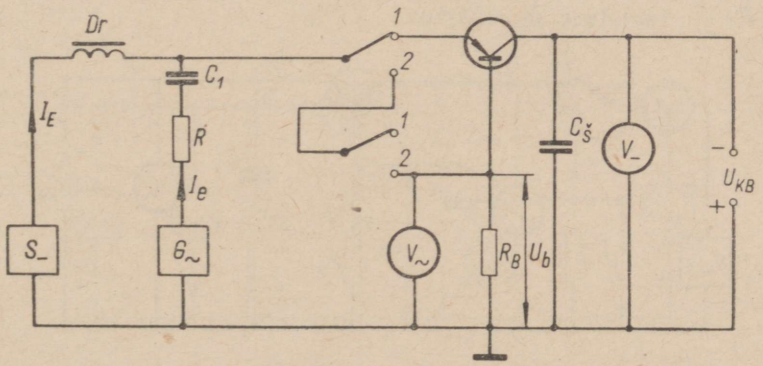
kus U_{b2} on pingelang baasitakistusel;

R_B — baasitakistuse väärtus.

Mõõdetakse lüliti asendis *1*. Mõõtmisel määratakse baasi vahelduvvool:

$$I_b = \frac{U_{b1}}{R_B}.$$

Kõrgetel sagedustel määratakse vooluvõimendusteguri moodul ligikaudselt järgmise valemiga:



Joon. 111. $|\beta|$ mõõteskeem

$$|\beta| = \frac{I_e}{I_b} = \frac{U_{b2}}{R_B}\frac{R_B}{U_{b1}} = U_{b2}\frac{1}{U_{b1}}.$$

Et U_{b2} seatakse igal kalibreerimisel samale suurusele, s. t. ta on konstant, siis mõõtmisel saadav pinge U_{b1} on pöördvõrdeline $|\beta|$-ga. Voltmeetri skaala võib otseselt gradueerida $|\beta|$ väärtustesse.

Joonisel 111 kujutatud drossel *Dr* takistab kõrgsagedusliku signaali pääsemist emitterivoolu stabilisaatorisse; kondensaator C_1 takistab alalisvoolu pääsemist kõrgsagedusgeneraatorisse; $C_š$ lühistab kollektori vahelduvvoolukomponendile.

9. 5. TRANSISTORI IMPULSSPARAMEETRITE MÕÕTMINE

Staatilise vooluvõimendusteguri *B* mõõtmine. Eespool kirjeldati vooluvõimendusteguri mõõtmist transistori alalisrežiimist tunduvalt väiksema voolu puhul.

Staatilist vooluvõimendustegurit mõõdetakse aga impulssvoolul tugeva signaali juures (joon. 112):

$$B = \frac{I_K}{I_B} = \frac{I_E - I_B}{I_B} = \frac{I_E}{I_B} - 1,$$

kus *B* on staatiline vooluvõimendustegur,

I_E — emitteriahela impulssvoolu amplituud,

I_B — baasiahela impulssvoolu amplituud,

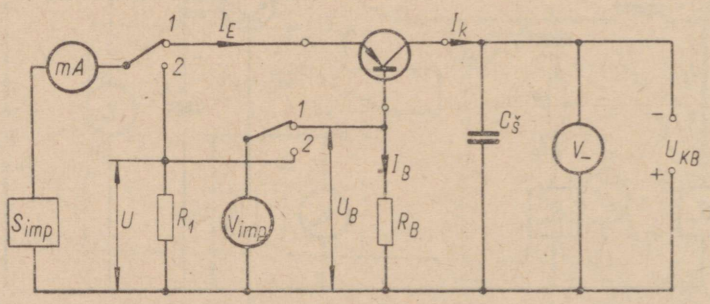
I_K — kollektoriahela impulssvoolu amplituud.

Kalibreeritakse lüliti asendis *2*. Voolustabilisaatori S_{imp} impulssvool

$$I = \frac{U}{R_1},$$

kus *U* on impulsspinge takistil R_1,

R_1 — takistuse R_1 väärtus.



Joon. 112. *B* mõõteskeem

Mõõtmine toimub lüliti asendis *1*.

Baasiahela impulssvool

$$I_B = \frac{U_B}{R_B},$$

kus R_B on baasitakistuse väärtus.

Staatiline vooluvõimendustegur

$$B = \frac{I_E}{I_B} - 1 = \frac{UR_B}{R_1 U_B} - 1,$$

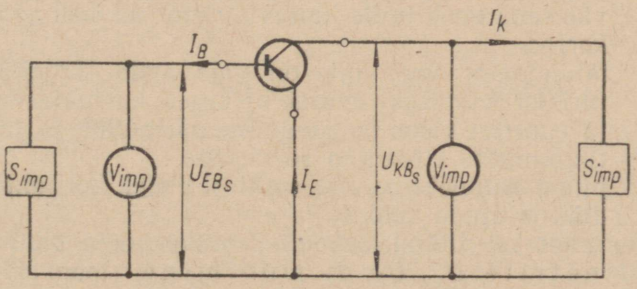
kus $R_B \frac{U}{R_1}$ on konstantne suurus.

Seega on B pöördvõrdeline mõõtmisel saadud pingega U_B. B skaala on pöördskaala ja analoogiline β skaalaga. Kondensaator C_s on kollektoriahela impulssvoolu maandamiseks.

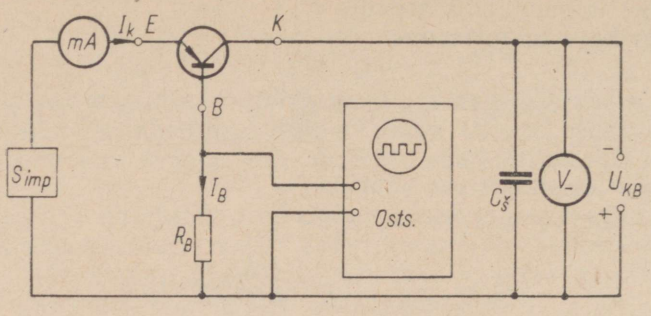
Baasi küllastuspinge U_{EBs} ja kollektori küllastuspinge U_{KBs} mõõtmine. Kui läbi siirde juhtida vool, tekib siirdel pingelang. See pingelang oleneb siiret läbiva voolu tugevusest. Et vähendada transistori soojenemist siiret läbiva voolu tõttu, on soovitav küllastuspinget mõõta impulssvooluga (joon. 113).

Mõõtmisel juhitakse läbi emittersiirde impulssvool I_B. Baasil tekkivat impulsspinget U_{EBs} mõõdetakse impulssvoltmeetriga. Samaaegselt tuleb juhtida läbi kollektorsiirde kollektorivool I_K. Kollektoril tekkivat pingelangu U_{KBs} mõõdetakse impulssvoltmeetriga, mille skaala on gradueeritud otseselt U_{KBs} väärtustes.

Kollektoripinge U_α mõõtmine. Alates teatud kollektoripingest U_{KB} toimub transistoris laviinitaoline läbilöök. Selle pinge väärtust ühise emitteriga lülituses tähistatakse U_α. Kui $U_{KB} > U_\alpha$, on transistori baasivoolu faas pööratud.



Joon. 113. U_{EBs} ja U_{KBs} mõõteskeem



Joon. 114. U_α mõõteskeem

Mõõtmisel antakse emitterile nõutud impulssvool (joon 114). Baasivoolu faasi üle otsustatakse ostsillograafi ekraanil saadud kujutise järgi. Kui etteantud kollektoripinge juures toimub faasi pööramine (impulsid langevad allapoole ostsillograafi ekraani keskjoonest), on $U_{KB} > U_\alpha$ ja katsetatav transistor on praak. Kondensaator $C_š$ on kollektoriahela impulssvoolu maandamiseks.

9. 6. TÜRISTORI PARAMEETRITE MÕÕTMINE

Türistori pinge-voolu tunnusjoon ja staatilised parameetrid. Türistori pinge-voolu tunnusjoon on toodud joonisel 115. Joonisel on kasutatud järgmisi tähiseid:

U_p on maksimaalne päripinge türistoril,
U_V — maksimaalne vastupinge türistoril,
I_{V1} — vastuvoolu väärtus maksimaalse päripinge puhul,
I_V — vastuvool,
I_a — kollektoriahela nimivool,
U_j — jääkpinge emitteri ja kollektori vahel avatud olukorras, kui läbi türistori voolab vool I_a,
I_{V2} — väikseim vool, mille juures türistor on veel avatud olukorras,
I_T — minimaalne vool, mis on vaja anda tüürelektroodile türistori viimiseks avatud olekusse, kusjuures kollektori ja emitteri vaheline pinge on päripidine ja tehnilistes tingimustes etteantud suurusega,
U_T — pinge tüürelektroodi ja emitteri vahel, kui juhtelektroodile on antud vool I_T.

Türistor avatakse tüürelektroodile antava voolu abil.

Parameetrite U_p, U_V, I_T mõõtmine (joon. 116). U_p mõõtmisel asetatakse türistor mõõtepesasse nii, et kollektoril oleks positiivne ja emitteril negatiivne pinge. Pinget suurendatakse

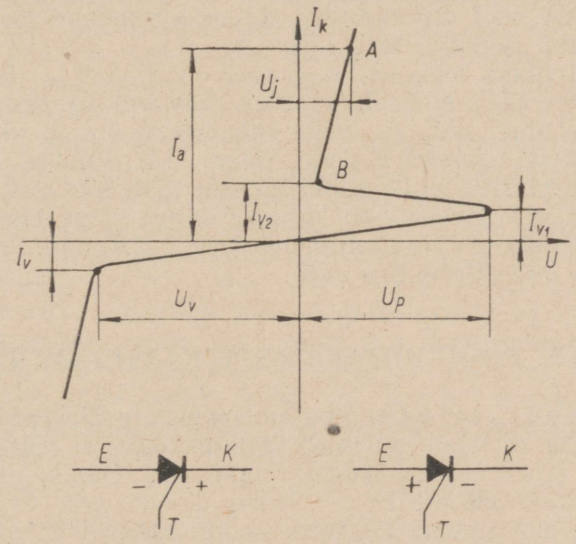
ja jälgitakse voltmeetri ning mikroampermeetri näitu. Pinge teatud suuruse juures türistor avaneb ja pinge langeb. Enne avanemist on kollektori ja emitteri vaheline maksimaalne pinge U_p. Selle pinge juures esinev vastuvool loetakse mikroampermeetrilt. Voolu piiramiseks türistori avanemise puhul on ahelas takisti R:

$$R = \frac{U_{max}}{I_{K\,max}},$$

kus U_{max} on katsetamisel esinev maksimaalne pinge;
$I_{K\,max}$ — maksimaalselt lubatav vool läbi türistori.

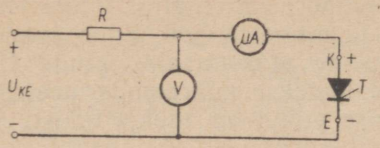
Türistori avanemisel tugevneb vool tunduvalt. Et vältida mikroampermeetri rikkumist, lülitatakse see relee abil ahelast välja (relee kontakte pole joonisel näidatud).

Vastupinge U_V mõõtmine toimub analoogiliselt, ainult kollektorile antakse negatiivne pinge, emitterile aga positiivne pinge. Pärast mõõtmist viiakse pinge nullini.

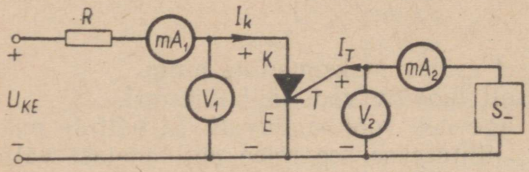


Joon. 115. Türistori pinge-voolu tunnusjoon

Parameetrite I_{Ta}, U_T, U_j, I_{V2} mõõtmine (joon. 117). Reguleeritava voolustabilisaatori vool I_T reguleeritakse võrdseks nulliga. Türistori kollektorile antakse voltmeetri näidu järgi 10 V. Seejärel suurendatakse pikkamööda voolustabilisaatori voolu I_T ja jälgitakse voltmeetrit V_2 ning milliampermeetrit mA_2. Avanemise tulemusena langeb pinge kollektori ja emitteri vahel tunduvalt.



Joon. 116. U_p, U_v, I_T mõõteskeem



Joon. 117. I_{Ta}, U_T, U_j ja I_{v2} mõõteskeem

Sel momendil registreeritakse milliampermeetri mA_2 abil I_T väärtus ja voltmeetri V_2 abil U_{Ta} väärtus. Kollektoripinge muutmisega reguleeritakse vool läbi türistori võrdseks nimivooluga I_a ja voltmeetri V_1 abil registreeritakse U_j.

I_{V2} mõõtmiseks reguleeritakse avatud türistori I_T võrdseks nulliga. Türistor jääb endiselt avatuks. Seejärel vähendatakse kollektoripinge abil voolu I_K. Selle tulemusena liigub türistori tööpunkt punktist A punkti B poole (joon. 115). Punktis B on voolu minimaalne väärtus, mille puhul türistor jääb veel avatuks. Türistori sulgumise tunnuseks on kollektoripinge järsk tõus. Vool I_{V2} punktis B registreeritakse milliampermeetri mA_1 abil. Pärast mõõtmist viiakse kollektoripinge nulli.

9.7. POOLJUHTSEADISTE KATSETAMINE

Dokumentatsioon. Pooljuhtseadiste projekteerimisel, valmistamisel ja katsetamisel tuleb lähtuda üldistest tehnilistest tingimustest (Полупроводниковые приборы. Общие технические условия. НаАО 336.001 ТУ). Selles dokumendis on määratud nõuded pooljuhtseadiste konstruktsiooni, elektriliste, mehaaniliste ja klimaatiliste omaduste kohta. Samuti on määratud pooljuhtseadiste kontrollimise ja vastuvõtmise kord, milleks teostatakse järgmised katsed:

1) vastuvõtu-üleandmiskatsed;
2) perioodilised katsed;
3) konstruktiivsed katsed;
4) eakatsed;
5) valikkontrollikatsed.

Samuti on antud dokumendis toodud loetletud katsete metoodika ja läbiviimise kord. Elektriliste parameetrite mõõteskeemid

on antud üldiste tehniliste tingimuste lisas nr. 1 (ОРТМ. Методы измерения электрических параметров полупроводниковых диодов и трансисторов. НаАО 366.006) või vastavates ГОСТ-ides. Enamik parameetrite mõõteskeeme on toodud eespool.

Et teha kindlaks transistori kvaliteeti, on veel vaja igale parameetrile määrata normid, millele ta peab vastama. Normid antakse iga konkreetse transistoritüübi kohta osalistes tehnilistes tingimustes (näit. Трансисторы типов П416, П416А, П416Б. Частные технические условия. ШПЗ. 361.001 ЧТУ.). Osalised tehnilised tingimused koostatakse pooljuhtseadise väljatöötaja poolt üldiste tehniliste tingimuste nõuetele vastavalt. Pooljuhtseadised tunnistatakse kõlblikeks, kui nad vastavad üldiste ja osaliste tehniliste tingimuste nõuetele. Osaliste tehniliste tingimuste üheks tähtsamaks osaks on elektriliste parameetrite tabel, kus on antud parameetrite lubatud väärtused ja mõõtmisvead.

Pooljuhtseadiste parameetrite statistiline jagunemine. Pooljuhtseadiste valmistamine on keerukas tehniline protsess, mis koosneb paljudest üksteisele järgnevatest operatsioonidest. Iga üksiku operatsiooni läbiviimise tingimused avaldavad mõju pooljuhtseadise parameetritele. Need tingimused pole aga püsivad. Nad sõltuvad klimaatilistest tingimustest, operatsioonides kasutatavate materjalide omadustest, operatsiooni läbiviimise kvaliteedist jne. Seepärast ei ole tänapäeval võimalik saada pooljuhtseadiseid ainult nõutavate parameetritega. Osa pooljuhtseadiseid osutub praagiks, osal parameetritest on lubatud piirides mitmesugused väärtused. Ainult ühe pooljuhtseadise parameetrite mõõtmise alusel ei ole võimalik hinnata kogu partii kvaliteeti. Seepärast on vaja mõõta kogu partii parameetreid (100% kontroll). Selliste mõõtmistulemuste põhjal saab teha järeldusi partii kui terviku kvaliteedi kohta (näit. milline on praagi % jne.), saab leida terve partii parameetrite väärtuste jagunemise ehk statistilise jagunemise. Partii kui terviku omaduste määramine toimub matemaatilise statistika ja tõenäosusteooria seaduste alusel, kusjuures lähtutakse mõõtmisandmetest.

Pooljuhtseadiste tüübid. Tootmises ei ole võimalik kindlustada pooljuhtseadiste ühesuguseid parameetreid. Valmistatud pooljuhtseadiseid kasutatakse elektronseadmetes (võimendid, raadiovastuvõtjad, mõõteriistad, elektronarvutid jne.), mille töö on võimalik ainult siis, kui pooljuhtseadise parameetrid on ettemääratud vahemikus. Seega tuleb pooljuhtseadiseid tootvas tehases jaotada laias piirkonnas jagunevate parameetritega pooljuhtseadised mitmesse gruppi, kusjuures ühe grupi piirides oleks parameetrite kõikumine väike. Parameeter võib olla piiratud mingis vahemikus (kahelt poolt piiratud) või olla piiratud alt või ülalt (ühelt poolt piiratud). Pooljuhtseadiste statistilise jagunemise tulemusena ja piiramistingimuste püstitamisel saadakse pooljuht-

seadiste tüübid. Ühe ja sellesama tehnoloogia järgi valmistatud pooljuhtseadistel on rida ühesugustele nõuetele vastavaid parameetreid ja mõned tüüpi määravad parameetrid. Viimaseid nimetatakse klassifitseerimisparameetriteks. Pooljuhtseadise tüüp määratakse mõõtmistulemuste põhjal.

Vastuvõtu-üleandmiskatsed. Klassifitseerimistabelid. Kui pooljuhtseadis monteeritakse elektronaparatuuri, peab olema garanteeritud tema parameetrite asumine etteantud vahemikus. Selleks toimuvad pooljuhte valmistavas tehases vastuvõtu-üleandmiskatsed. Esialgu jaotatakse pooljuhtseadised tüüpide järgi tootvas tsehhis vastavalt tehnoloogias kinnitatud nõuetele (nn. tsehhinormid). Tüüpide järgi jaotamist kontrollib tehnilise kontrolli osakond (nn. TKO-normid). Mõlemal juhul kontrollitakse 100%-liselt. Eriti vastutusrikaste pooljuhtseadiste korral teeb tellija esindaja täiendavad valikkatsed vastavalt tehniliste tingimuste nõuetele. Reeglina on kõige rangemad tsehhinormid, seejärel TKO-normid ja siis tehniliste tingimuste normid.

Transistoride tüübid määratakse klassifitseerimistabelite alusel, mis on antud tehnoloogias (tsehhinormid, TKO-normid). Nendes tabelites on toodud transistoride parameetrite lubatud väärtused antud tüübi jaoks.

Parameetrite mõõtmise järjekord. Pooljuhtseadise tüübi kindlaksmääramiseks mõõdetakse tema parameetreid. Pole hoopiski ükskõik, millises järjekorras parameetreid mõõta. Üldreeglina mõõdetakse esmalt neid parameetreid, mille puhul praagiprotsent on maksimaalne (näit. transistoride puhul I_{k0}, β jne.). Edasi mõõdetakse väiksema praagiprotsendiga parameetreid. Mõõtmiste käigus võib pooljuhtseadis mõne parameetri väärtuse tõttu ümber paigutuda teise tüüpi. Mõõtmiste järjekord on määratud klassifitseerimistabeliga. Transistori tüübi kindlaksmääramist üksikute mõõtmistulemuste põhjal nimetatakse klassifitseerimiseks.

Perspektiivid pooljuhtseadiste klassifitseerimiseks. Pooljuhtseadiste tüübi määramine üksikute parameetrite mõõtmise tulemusena on töömahukas toiming. Klassifitseerimisoperatsioonidel kasutatava tööjõu vähendamiseks on ehitatud poolautomaatsed klassifikaatorid. Neid klassifikaatoreid laeb käsitsi üks või kaks operaatorit. Pooljuhtseadiste transport mõõtmispositsioonidesse ja parameetrite mõõtmine toimub automaatselt. Mõõtmistulemused salvestatakse klassifikaatori «mälus» ja nende alusel määrab klassifikaator pooljuhtseadise tüübi. Pooljuhtseadis transporditakse automaatselt vastava tüübi kasti. Niisuguse klassifikaatori tootlikkus on 800 ... 1200 toodet tunnis.

Perioodilised katsed. Perioodilisi katseid tehakse 1 kord kuus. Nende katsete eesmärgiks on määrata kindlaks kuu jooksul valmistatud pooljuhtseadiste kvaliteet. Perioodiliste katsete

programm on laialdasem kui tavalistel vastuvõtmis-üleandmiskatsetel. Kontrollitakse näiteks pooljuhtseadiste võimet taluda kõrgeid ja madalaid temperatuure, vibratsiooni, lööke, niiskust jne. Katsete liigid, nende metoodika ja normid on fikseeritud üldistes ja osalistes tehnilistes tingimustes.

Perioodilisi katseid tehakse ainult väikese osaga kuu jooksul valmistatud pooljuhtseadistest (valikuliselt). Katsete tulemuste põhjal aga otsustatakse kogu kuu jooksul valmistatud toodete kvaliteedi üle ning vormistatakse katseprotokollid. Kui perioodilised katsed lõpevad ebarahuldavalt (tooted ei vasta tehniliste tingimuste normidele), katkestatakse kogu toodangu vastuvõtt ja tehakse täiendavad perioodilised katsed. Kui ka täiendavad katsed ei anna rahuldavaid tulemusi, teostatakse kogu toodangu (100%) ülemõõtmine kriitilise parameetri järgi.

Konstruktiivsed katsed. Konstruktiivsed katsed tehakse pärast pooljuhtseadise väljatöötamist, pärast konstruktiivseid muudatusi ja jooksvale toodangule 1 kord aastas. Katsete eesmärgiks on selgitada pooljuhtseadise konstruktsiooni vastavust tehniliste tingimuste nõuetele. Katsete liigid ja metoodika on määratud tehnilistes tingimustes.

Eakatsed. Pooljuhtseadiseid kasutatakse vastutusrikkas elektronaparatuuris (elektronarvutid, Maa tehiskaaslased jne.), kus ühe elemendi rike võib kutsuda esile kogu seadme töövõimetuse. Seepärast huvitab kasutajaid pooljuhtseadiste töövõime pikaajalise töötamise kestel. Selle määramiseks tehakse katseid, mille puhul eelnevalt mõõdetud pooljuhtseadiseid hoitakse 5000 või 10 000 tundi tööolukorras. Pärast seda määratakse katsetatavate pooljuhtseadiste parameetrid uuesti. Mõõtmistulemuste abil otsustatakse pooljuhtseadiste töövõime üle pikaajalisel töötamisel. Seda töövõimet iseloomustatakse mõistega töökindlus. Pooljuhtseadise töökindluseks nimetatakse tema omadust etteantud aja vältel säilitada oma parameetrid tehnilistes tingimustes etteantud piirides.

Valikkatsed. Valikkatseid teevad väikese osaga toodangust vastava tehase toodanguga tegelevad välisinstantsid. Valikkatsete eesmärgiks on toodete parameetrite jälgimine erapooletute instituutide poolt selles asuva mõõteaparatuuri abil.

Katseandmete vormistamine ja kasutamine. Ainult need katsetulemused on kasutatavad, mis on nõuetekohaselt vormistatud. Katsetulemused kantakse katseprotokolli. Katseprotokolli vorm on tavaliselt määratud ja ta sisaldab reeglina katseprotokolli numbri, katse nimetuse ja eesmärgi, katse tegemise aja, katse metoodika, välistingimuste loetelu (temperatuur, vibratsioon, niiskus jne.), katse tulemused. Katseprotokollile kirjutavad alla katsetaja, juhendaja ja laboratooriumi juhataja.

Kui katsetulemusi on ülevaatlikum esitada graafiliselt, joones-

tatakse katseprotokolli alusel graafik, millel tuleb tähistada graafiku nimetus, telgede nimetused ja mõõtkava, katse tingimused, katseprotokolli number, koostaja ning kontrollija nimed ja allkirjad.

Katseprotokollide abil otsustatakse katsete vastavuse üle püstitatud tehnilistele nõuetele. Samuti annavad katseprotokollid ja graafikud pildi pooljuhtseadiste kvaliteedi muutumisest ning juhivad tähelepanu valmistamistehnoloogia halvenemisele või vajadusele seda muuta.

10. ALALIS- JA VAHELDUVVOOLU PÕHIMÕISTED

10.1. ALALISVOOL

Elektrivoolu olemus. Potentsiaal ja pinge. Aatomid koosnevad positiivselt laetud tuumast ja selle ümber tiirlevatest negatiivselt laetud elektronidest. Need laengud on omavahel külgetõmbejõududega seotud. Kui tuuma positiivne laeng on võrdne tema ümber tiirlevate elektronide negatiivsete laengute summaga, siis aatom on elektriliselt neutraalne. Võib juhtuda, et tuuma mõjupiirkonnast lahkub üks või mitu elektroni. Aatomituuma positiivne laeng ületab sel juhul tema ümber tiirlevate elektronide negatiivse laengu ja aatom on laetud positiivselt. Samuti võib tuuma ümber tiirlevate elektronide laengute summa ületada tuuma positiivse laengu. Aatom on sel juhul laetud negatiivselt. Kehale elektrilise laengu andmine tähendab selle keha aatomite tuuma ja elektronide laengute vahelise tasakaalu rikkumist. Kehale antud laengu suurust tähistatakse tähega q.

Selleks et laenguid üksteisest eraldada, tuleb ületada erinimeliste laengute vaheline külgetõmbejõud. Mõnede ainete aatomites on elektronid seotud tuumaga nõrgalt (näiteks metallid). Nad eralduvad kergesti aatomitest ja liiguvad korrapäratult metalli sees. Metalli hea elektrijuhtivus seletubki vabade elektronide olemasoluga. Teistes ainetes on elektronide side tuumaga tugev ja elektronide eraldamiseks aatomist tuleb rakendada suurt energiat. Selliseid aineid nimetatakse isolaatoriteks ehk dielektrikuteks. Pooljuhtides on elektronide vabastamiseks vajalik energia suurem kui juhtides ja väiksem kui isolaatorites.

Iga laetud keha põhjustab ruumis elektrivälja. Elektrivälja olemasolu avaldub tõmbe- või tõukejõuna sellesse välja paigutatud laengule. Katseliselt võib kindlaks teha, et samanimeliselt laetud kehad tõukuvad, erinimeliselt laetud kehad tõmbuvad. Olgu mingi keha positiivselt laetud. Kui lõpmata kaugelt tuua selle keha ligidusse teine positiivne keha, siis tuleb positiivsete laengute tõukejõude ületades teha tööd. Selle töö suhet ümberpaigutatava keha laengusse nimetatakse antud väljapunkti potentsiaaliks ja tähistatakse tähega φ.

$$\varphi = \frac{A}{q},$$

kus A on laengu ümberpaigutamisel tehtud töö,
q — keha laeng.

Kahe väljapunkti potentsiaalide vahet nimetatakse pingeks:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2,$$

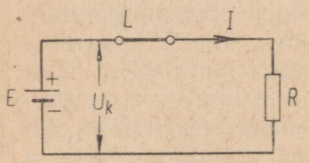
kus φ_1 on potentsiaal esimeses väljapunktis,
φ_2 — potentsiaal teises väljapunktis.

Nii potentsiaali kui ka pinge mõõtühikuks on volt. Praktikas osutub tihti vajalikuks kasutada voldist väiksemaid või suuremaid ühikuid:

1000 V = 10^3 V = 1 kV (kilovolt);
0,001 V = 10^{-3} V = mV (millivolt);
0,000001 V = 10^{-6} = 1 μV (mikrovolt).

Elektromotoorjõu, voolu, takistuse ja juhtivuse mõiste. Alalisvooluring ja tema osad. Kui suletud elektrivooluringis elektrijuhi kahe mistahes punkti potentsiaalide vahe ei muutu, siis voolab selles vooluringis alalisvool. Seega on voolu hoidmiseks vooluringis vaja juhis tekitada ja hoida potentsiaalide vahet. Seda ülesannet täidab vooluallikas. Selleks võib olla akumulaator, kuivelement, alaldi jne. Vooluallika elektromotoorjõuks E nimetatakse laengu ümberpaigutamisel kogu suletud vooluringis tehtud töö ja laengu suhet. Elektromotoorjõudu mõõdetakse voltides (V).

Kui ühendada vooluallikas juhtmete abil tarbijaga (näit. hõõglamp, elektriahi, reostaat) ja sulgeda lüliti, tekib suletud vooluring. Vooluallika elektromotoorjõu mõjul tekib selles vooluringis elektrivool (joon. 118). Joonisel tähistab E vooluallikat, R tarbijat, U_k klemmipinget ja L lülitit.



Joon. 118. Vooluring

Elektrivoolu suunda loetakse kokkuleppeliselt vooluallika positiivselt klemmilt läbi vooluringi välise osa negatiivsele klemmile ja sealt läbi vooluallika enda positiivsele klemmile. Elektrivoolu tekitamiseks peab vooluring alati olema suletud.

Voolu tähistatakse tähega I ja mõõdetakse amprites (A).

Praktikas kasutatakse veel järgmisi ühikuid:

0,001 A = 10^{-3} A = 1 mA (milliamper);
0,000001 A = 10^{-6} A = 1 μA (mikroamper).

Elektrienergia tarbijaid iseloomustatakse nende elektrilise takistuse abil. Elektrit juhtiva aine omadust raskendada laengu-

kandjate suunatud liikumist nimetatakse aine elektriliseks takistuseks.

Elektriline takistus R on aine omadus. Kuid igapäevases elus nimetatakse takistuseks sageli takistust omavat eset ennast. Nende mõistete eristamiseks nimetame takistust omavat eset *takistiks*.

Takistust tähistatakse tähega R ja tema mõõtühikuks on 1 oom (Ω). Kasutatakse veel järgmisi ühikud:

$1000\ \Omega = 10^3\ \Omega = 1\ k\Omega$ (kilo-oom);
$1000000\ \Omega = 10^6\ \Omega = 1\ M\Omega$ (megaoom).

Mõnikord tarvitatakse ka elektrilise juhtivuse mõistet. Juhtivus on takistuse pöördväärtus. Juhtivust tähistatakse tähega G ja tema mõõtühikuks on siimens (S), kusjuures 1 S on oomi pöördvõrdeline suurus

$$G = \frac{1}{R}\ \text{S}.$$

Eritakistus. Takistuse sõltuvus temperatuurist. Juhi takistus sõltub ainest. Erinevaid aineid iseloomustatakse eritakistusega. Aine eritakistuseks nimetatakse sellest ainest 1-m² ristlõikega juhtme takistust oomides temperatuuril 293° K (20° C). Eritakistust tähistatakse tähega ϱ, mõõtühikuna kasutatakse Ωm. Vanemates raamatutes kasutatakse ka mõõtühikut $\Omega \cdot mm^2/m$. Siinjuures $1\ \Omega m = 10^6\ \Omega \cdot mm^2/m$.

Kui on teada eritakistus, juhtme pikkus ja ristlõige, on võimalik arvutada juhtme takistust:

$$R = \frac{\varrho l}{s},$$

kus R on juhtme takistus oomides,
l — juhtme pikkus meetrites,
s — juhtme ristlõige ruutmeetrites.

Juhtme takistus sõltub temperatuurist. Enamiku metallide takistus temperatuuri tõusuga suureneb, sest temperatuuri tõusuga suureneb aine molekulide soojusliku võnkumise võnkeamplituud, mis takistab elektronide suunatud liikumist. Vastupidiselt metallidele pooljuhtide takistus temperatuuri tõusuga väheneb. Takistuse muutumist sõltuvalt temperatuurist iseloomustatakse temperatuuriteguriga α, mis näitab 1-oomise takistuse muutumist oomides 1° C kohta. Temperatuuritegur on elektrijuhtidel enamasti positiivne, pooljuhtidel, söel ja elektrolüütidel aga negatiivne. Takistus mingil temperatuuril t arvutatakse järgmise valemiga:

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 293)],$$

kus R_t on takistuse väärtus temperatuuril t,
α — temperatuuritegur,

R_{20} — takistuse väärtus temperatuuril 273° K,
t — temperatuur °K.

Ohmi seadus ahela osa kohta. Ohmi seadus on elektrotehnika tähtsaim seadus, mis seob omavahel pinge, voolu ning takistuse suurused. Järgnevalt vaatleme Ohmi seadust ahela osa kohta.

Vool I läbi takisti on võrdeline takistile rakendatud pingega U ja pöördvõrdeline selle takisti takistusega R:

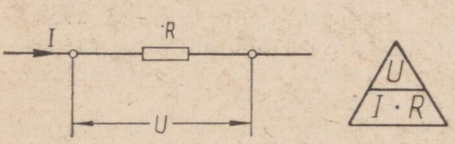
$$I = \frac{U}{R}.$$

Ohmi seadus võimaldab kahe teadaoleva suuruse järgi leida kolmandat:

$$U = IR; \quad R = \frac{U}{I}.$$

Joonisel 119 toodud kolmnurga abil on lihtne Ohmi seadust meeles pidada.

Kattes kinni otsitava suuruse, näiteks U, saame valemi $U = IR$.



Joon. 119. Illustratsioon Ohmi seadusele

Näide. Elektriahju klemmidel on pinge 220 V. Leida ahju küttekeha takistus, kui vool läbi küttekeha on 5 A.

Takistus

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44\ \Omega.$$

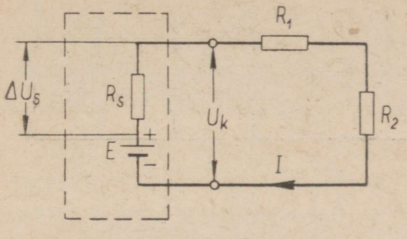
Ohmi seadus ahela kohta. Vool on võrdeline vooluringi lülitatud elektromotoorjõudude algebralise summaga ja pöördvõrdeline vooluringi kogu takistusega (takistuste summaga):

$$I = \frac{\Sigma E}{\Sigma R},$$

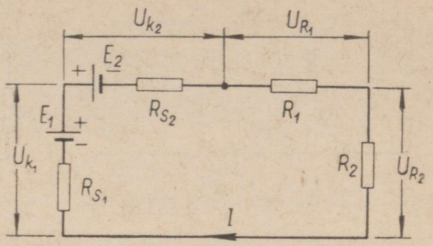
kus I on vool vooluringis,
ΣE — elektromotoorjõudude algebraline summa,
ΣR — vooluringi lülitatud takistuste summa.

Siinjuures tuleb arvestada, et elektromotoorjõu allikatel (akumulaatorid, generaatorid jne.) on sisetakistus R_s.

Vooluallika sisetakistuse R_s tõttu tekib vooluallika koormamisel koormusvoolu I mõjul vooluallika sees pingelang, mida nimeta-



Joon. 120. Illustratsioon Ohmi seadusele kogu vooluringi kohta



Joon. 121. Skeem näite juurde

takse pingelanguks vooluallikas (joon. 120). Ohmi seaduse järgi avaldub see pingelang järgmiselt:

$$\Delta U_s = IR_s,$$

kus ΔU_s on pingelang vooluallikas;
I — koormusvool;
R_s — vooluallika sisetakistus.

Seetõttu jääb vooluallika klemmipinge U_k väiksemaks kui elektromotoorjõud E. Klemmipinge

$$U_k = E - \Delta U_s = E - IR_s.$$

Toodud valemist on näha, et vooluallika klemmipinge sõltub koormusvoolust I ja väheneb voolu suurenemisega. Kui koormusvool on null (tühijooksurežiim), siis on vooluallika klemmipinge võrdne elektromotoorjõuga.

Näide. Leida joonisel 121 toodud skeemi järgi ahelas tekkiv vool, vooluallikate klemmipinged U_{k1}, U_{k2} ning pinged tarbijatel R_1 ja R_2, kui $E_1 = 12$ V, $E_2 = 2$ V, $R_{s1} = 0{,}2\ \Omega$, $R_{s2} = 0{,}1\ \Omega$, $R_1 = 8\ \Omega$, $R_2 = 1{,}7\ \Omega$.

Vool I määratakse Ohmi seaduse järgi kogu ahela kohta:

$$I = \frac{\Sigma E}{\Sigma R} = \frac{10}{10} = 1\text{A},$$

kus $\Sigma E = E_1 - E_2 = 12 - 2 = 10$ V (vooluallikad on ühendatud ahelasse vastupidise polaarsusega, sellepärast $-E_2$);

$$\Sigma R = R_{s1} + R_{s2} + R_1 + R_2 = 0{,}2 + 0{,}1 + 8 + 1{,}7 = 10\ \Omega.$$

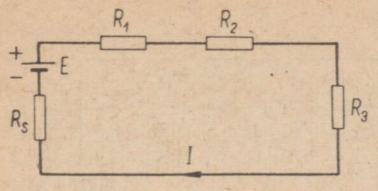
Vooluallikate klemmipinged:

$$U_{k1} = E_1 - IR_{s1} = 12 - 1 \cdot 0{,}2 = 11{,}8\text{ V};$$
$$U_{k2} = E_2 - IR_{s2} = 2 - 1 \cdot 0{,}1 = 1{,}9\text{ V}.$$

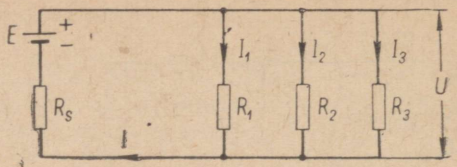
Pinged tarbijatel R_1 ja R_2 Ohmi seaduse põhjal:

$$U_{R1} = IR_1 = 1 \cdot 8 = 8\text{ V};$$
$$U_{R2} = IR_2 = 1 \cdot 1{,}7 = 1{,}7\text{ V}.$$

Tarbijate ühendamine vooluringi. Tarbijaid saab



Joon. 122. Tarbijate jadaühendus



Joon. 123. Tarbijate rööpühendus

omavahel vooluringi ühendada kolmel viisil: jadaühenduses, rööpühenduses ja segaühenduses.

Jadaühenduses on tarbijad ühendatud üksteisega järjestikku ja neid läbib üks ja seesama vool I, mis määratakse Ohmi seadusega kogu ahela kohta (joon. 122):

$$I = \frac{E}{\Sigma R},$$

kus $\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3$.

Rööpühenduses on kõikidel tarbijatel võrdne pinge ja voolud läbi tarbijate leitakse Ohmi seaduse abil ahela osa kohta (joon. 123):

$$I_1 = \frac{U}{R_1};$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2};$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

Üldine vool I leitakse samuti Ohmi seaduse abil:

$$I = \frac{E}{\Sigma R},$$

siin

$$\Sigma R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}.$$

Kahe rööbiti ühendatud tarbija korral nende summaarne takistus

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Segaühendus on kombinatsioon jada- ja rööpühendustest (joon. 124). Summaarne takistus avaldub järgmiselt:

$$\Sigma R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

Elektrivõimsus. Võimsus näitab, kui suurt tööhulka suudab teha mingi seade ajaühiku vältel. Elektrilist võimsust tähistatakse tähega P ja ta võrdub voolu ja pinge korrutisega:

$$P = UI.$$

Võimsuse ühikuks on vatt (1 W), s. o. 1-V pinge ja 1-A voolu poolt sooritatav töö 1 sekundi vältel. Tarvitatakse veel ühikut kilovatt: (kW), kusjuures kW = 1000 W.

Elektrivoolu poolt tehtud töö. Elektrivoolu poolt tehtud töö leidmiseks tuleb tarbija võimsus (ajaühiku vältel tehtav töö) korrutada ajaga:

$$A = Pt = UIt,$$

kus U on tarbija pinge,
I — vool läbi tarbija,
t — aeg.

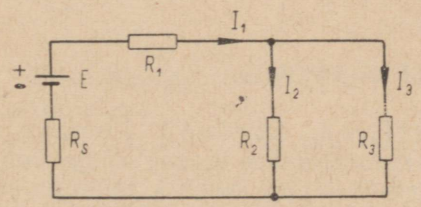
Elektrivoolu poolt tehtava töö ühikuteks on vattsekund (Ws) ja kilovatt-tund (kWh).

1 Ws = 1 W · 1 s = 1 džaul;
1 kWh = 1 kW · 1 h = 1000 W · 3600 s = 3,6 milj. Ws.

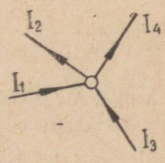
Joule-Lenzi seadus. Kui vool läbib juhet või takistit, eraldub sellel takistil soojus.

Voolu mõjul teatava aja vältel takistil eralduv soojushulk on võrdeline voolu ruuduga, juhtme takistusega ja ajaga:

$$Q = I^2Rt,$$

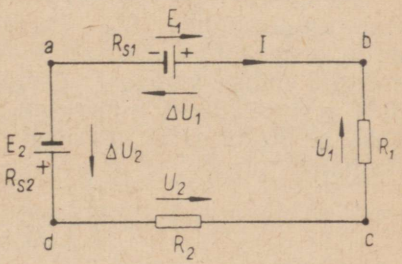


Joon. 124. Tarbijate segaühendus



Joon. 125. Kirchhoffi I seaduse rakendamine voolu hargnemispunktis

Joon. 126. Kirchhoffi II seaduse rakendamine



kus Q on soojushulk džaulides,
I — tarbijat läbiv vool amprites,
R — tarbija takistus oomides,
t — aeg sekundites.

Joule-Lenzi seaduse abil on näiteks võimalik arvutada elektripliidi poolt antavat soojushulka teatava aja vältel.

Kirchhoffi seadused. Kirchhoffi I seadus. Igasse hargnemispunkti juurdevoolavate voolude summa võrdub sealt äravoolavate voolude summaga (joon. 125):

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4;$$
$$I_1 + I_3 - I_2 - I_4 = 0$$
ehk $\sum I = 0.$

Kirchhoffi II seadus. Kinnises vooluringis võrdub elektromotoorjõudude algebraline summa pingelangude algebralise summaga (joon. 126):

$$\sum E = \sum (IR),$$

kus ΣE on $E_1 - E_2$;

$$\sum (IR) = IR_{S1} + IR_1 + IR_2 + IR_{S2};$$
$$IR_{S1} = \Delta U_1; \quad IR_{S2} = \Delta U_2; \quad IR_1 = U_1; \quad IR_2 = U_2.$$

Seega võrdub elektromotoorjõudude summa pingelangude summaga:

$$\sum E = \Delta U_1 + \Delta U_2 + U_1 + U_2.$$

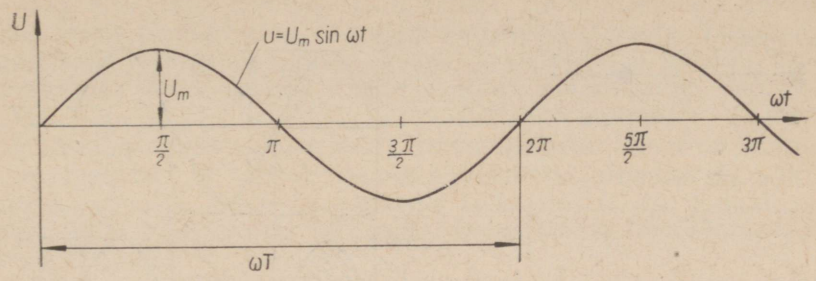
Kirchhoffi seaduste ja Ohmi seaduse abil on võimalik arvutada elektriahelaid.

10. 2. VAHELDUVVOOL

Vahelduvvoolu amplituud, periood ja sagedus. Vahelduvpingeks (-vooluks) nimetatakse igasugust perioodiliselt oma suurust ja suunda muutvat pinget (voolu), toimugu see muutus mistahes perioodilise funktsiooni kohaselt. Tehnikas kasutatakse enamasti siinuseliselt muutuvat pinget (voolu). Sellise pinge kuju on toodud joonisel 127.

Vahelduvpinge (-voolu) maksimaalset väärtust nimetatakse tema amplituudiks U_m. Perioodiks nimetatakse ajavahemikku, mille kestel pinge sooritab täisvõnke ja omandab nii suuruselt kui märgilt endise väärtuse. Perioodi tähistatakse tähega T. Perioodide arvu sekundis nimetatakse sageduseks f. Sageduse mõõtühikuks on herts (Hz). Perioodi ja sageduse omavaheline seos on järgmine:

$$f = \frac{1}{T}, \quad T = \frac{1}{f}.$$



Joon. 127. Vahelduvpinge sinusoid

Siinuseliselt muutuva pinge suurust võib igal hetkel kirjeldada võrrandiga

$$u = U_m \sin \omega t,$$

kus $\omega = 2\pi f$ on nurksagedus;

t — aeg.

Analoogiliselt vool $i = I_m \sin \omega t$.

Nõukogude Liidus ja Euroopas kasutatakse tööstuses ja majapidamises vahelduvvoolu sagedusega 50 Hz.

Efektiivvool ja efektiivpinge. Efektiivvool on selline vahelduvvool, mis annab teatava aja vältel niisama suure hulga tööd kui temaga võrdse tugevusega alalisvool.

Siinuselise voolu efektiivväärtus on seotud amplituudväärtusega järgmiselt:

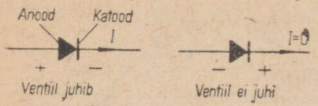
$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, I_m.$$

Efektiivpinge on see pinge, mis vooluringis kutsub esile efektiivvoolu

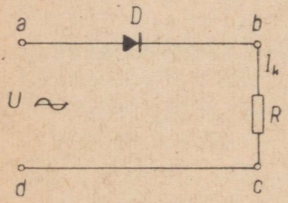
$$U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, U_m.$$

Vahelduvvoolu puhul arvestatakse tavaliselt pinge ja voolu efektiivväärtusi. Sel juhul jäetakse indeks *ef* U ja I juurest ära. Kõik tavalised vahelduvvoolumõõteriistad näitavad efektiivväärtusi.

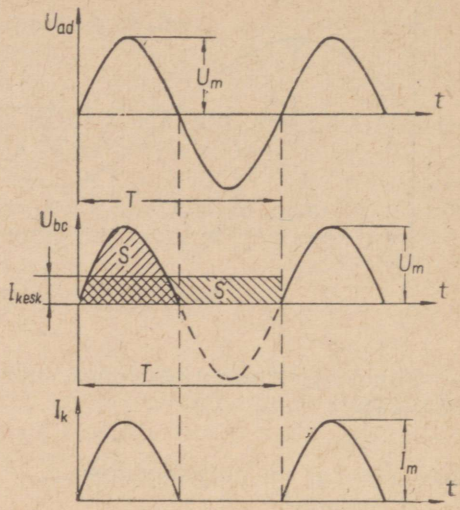
Alaldi. Pinge ja voolu keskväärtus. Tihti saadakse alalisvoolu abiseadmete vahendusel vahelduvvooluvõrgust. Selliseks seadmeks on alaldi. Alaldi põhiliseks osaks on ventiil (vt. pooljuhtdiood). Ventiil juhib voolu siis, kui tema anoodil on positiivne ja katoodil negatiivne pinge, ja ei juhi voolu vastupidise polaarsuse korral (joon. 128). Alaldi skeem on toodud joonisel 129, kus U on vahelduvpinge alaldi sisendil, I_k — vool läbi tarbija, R — tarbija ja D — ventiil.



Joon. 128. Ventiilid



Joon. 129. Alaldi skeem



Joon. 130. Pingete muutumine ajas alaldi klemmidel

Pingete ajaline muutumine klemmidel *ad* (sisend) ja *bc* (väljund) on toodud joonisel 130.

Voolu hindamiseks läbi koormuse kasutatakse keskväärtuse mõistet. Ristküliku kõrgus, mille aluseks on periood ja mille pindala on võrdne pulseeriva voolu pindalaga perioodi kestel ($S = S'$), on pulseeriva voolu keskväärtuseks. Siinuselise voolu ja vaadeldud poolperioodalaldi korral on voolu amplituud keskväärtusega seotud järgmiselt:

$$I_{kesk} = \frac{1}{\pi} I_m = 0{,}319\, I_m.$$

Analoogiliselt määratakse pinge keskväärtus:

$$U_{kesk} = 0{,}319\, U_m.$$

Täisperioodalaldi korral on skeem keerulisem ja läbi koormuse voolab mõlema poolperioodi vältel ühesuunaline vool. Sel juhul on alaldatud voolu ja pinge keskväärtus 2 korda suurem:

$$I_{kesk} = \frac{2}{\pi} I_m; \qquad U_{kesk} = \frac{2}{\pi} U_m.$$

I n d u k t i i v s u s. Kui juhtmes voolab vool, tekib juhtme ümber magnetväli. Juhtmes, mis asub muutuvas magnetväljas, tekib elektromotoorjõud.

Kui mingi sirgest traadist takisti R ühendada vooluallikaga, saavutab vool peaaegu silmapilkselt oma maksimaalse väärtuse.

Kui seesama traat mähkida ümber raudsüdamiku, saavutab vool maksimaalväärtuse pärast traadi vooluallikaga ühendamist tunduvalt pikema aja möödumisel (joon. 131, *a* ja *b*). Voolu suurenedes tekib juhtme ümber muutuv magnetvoog, mis seda juhet lõigates indutseerib selles vastuelektromotoorjõu E (endainduktsiooni elektromotoorjõud). Raudsüdamiku puhul on magnetvoog tugevam ja tekitab suurema vastuelektromotoorjõu. Ahela takistavat mõju voolu kasvamisele iseloomustatakse induktiivsusega, mida tähistatakse tähega L. Induktiivsuse mõõtühikuks on henri (H).

Pooli induktiivsus on 1 henri, kui temas 1 sekundi vältel 1 ampri võrra muutuv vool tekitab endainduktsiooni elektromotoorjõu 1 volt.

Praktikas kasutatakse veel järgmisi ühikuid:

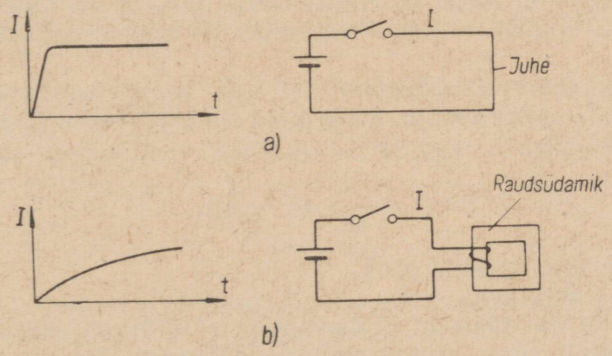
$0{,}001\ \mathrm{H} = 10^{-3}\ \mathrm{H} = 1\ \mathrm{mH}$ (millihenri);
$0{,}000001\ \mathrm{H} = 10^{-6}\ \mathrm{H} = 1\ \mu\mathrm{H}$ (mikrohenri).

M a h t u v u s. Elektrivoolu olemuse selgitamisel nägime, et kehadele saab tekitada elektrilise laengu. Elektrilist laengut tähistatakse tähega q ja tema mõõtühikuks on 1 kulon (1 C). 1 kulon on elektrihulk, mis voolab läbi juhtme 1 sekundi vältel, kui voolu tugevus on 1 amper.

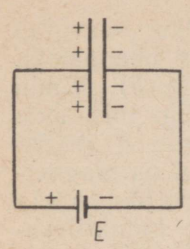
Kui ühendada kaks lähestikku asetatud tasaparalleelset plaati elektromotoorjõu allika klemmidega, tekib plaatidel laeng (joon. 132).

Selle laengu suurus on võrdeline vooluallika pingega ja plaatidevahelise mahtuvusega. Kondensaatori omadust mahutada endasse teatavat elektrihulka nimetatakse kondensaatori mahtuvuseks. Mahtuvust tähistatakse tähega C ja tema mõõtühikuks on farad (F).

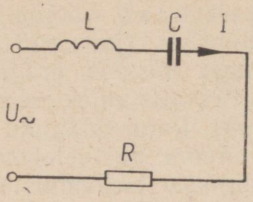
1 F on sellise keha mahtuvus, mis 1 kuloni suuruse laengu mõjul omandab pinge 1 volt.



Joon. 131. Voolu tugevuse ajaline kasv väikese (*a*) ja suure (*b*) induktiivsusega ahelates



Joon. 132. Tasaparalleelsete plaatide laadimine



Joon. 133. Induktiivsuse, mahtuvuse ja aktiivtakistuse jadaühendus

Praktikas kasutatakse järgmisi ühikuid:

0,000001 F = 10^{-6} F = 1 μF (mikrofarad);
0,000000001 F = 10^{-9} F = 1 nF (nanofarad);
0,000000000001 F = 10^{-12} F = 1 pF (pikofarad).

Aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistus. Kui lülitada sirge takistustraadist juhe vahelduvvooluringi, eraldub selles juhtmes soojus. Aktiivtakistuseks nimetatakse vooluringi sellist elementi, milles vahelduvvoolu läbimisel kogu elemendile antud energia muutub ainult soojuseks. Kui vahelduvvooluahelasse lülitada induktiivsus, siis induktiivsusel praktiliselt soojust ei eraldu, ehkki induktiivsus avaldab selles ahelas takistuslikku mõju. Seda mõju iseloomustatakse ahela induktiivtakistuse väärtusega

$$x_L = \omega L = 2\pi f L = 6{,}28 f L,$$

kus x_L on induktiivtakistus,
$\omega = 2\pi f$ — nurksagedus,
L — induktiivsus.

Induktiivtakistuse mõõtühikuks on analoogiliselt aktiivtakistusega samuti oom (Ω). Vahelduvvoolu toimel muutub induktiivsusel vahelduvvooluenergia magnetväljaenergiaks, mistõttu induktiivsus avaldab takistuslikku mõju vahelduvvoolule. Induktiivtakistuse valemist on näha, et alalisvoolule ($f = 0$) on induktiivtakistus $x_L = 0$. Induktiivtakistus suureneb võrdeliselt sageduse suurenemisega.

Kui vahelduvvooluahelasse lülitada mahtuvus, avaldab see samuti takistuslikku mõju. Seda mõju iseloomustatakse ahela mahtuvustakistusega

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C},$$

kus x_C on mahtuvustakistus,
C — mahtuvus.

Valemist on näha, et alalisvoolule ($f = 0$) on mahtuvustakistus lõpmatult suur. Kondensaator alalisvoolu läbi ei lase. Sageduse suurenedes mahtuvustakistus väheneb. Vahelduvvoolu toimel

muutub mahtuvuses vahelduvvooluenergia elektriväljaenergiaks, mistõttu mahtuvus avaldab takistuslikku mõju vahelduvvoolule.

Induktiivsuse, mahtuvuse ja aktiivtakistuse jadalülitus. Induktiivsuse, mahtuvuse ja aktiivtakistuse jadalülituse korral näivtakistus (kogutakistus)

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2},$$

kus z on näivtakistus,
x_L — induktiivtakistus,
x_C — mahtuvustakistus.

See takistuse väärtus oleneb sagedusest, sest x_L ja x_C olenevad sagedusest. Asetades valemisse eelmises punktis leitud x_L ja x_C väärtused, saame:

$$z = \sqrt{r^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}.$$

Ohmi seadus vahelduvvooluahelas. Vahelduvvooluahelates kehtivad samad seadused mis alalisvooluahelate puhul, kusjuures aktiivtakistus tuleb asendada näivtakistusega.

Joonisel 133 toodud skeemis leitakse vool järgmiselt:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}}.$$

Pingeresonants. Vaatleme induktiivsuse, mahtuvuse ja aktiivtakisti jadaühendust (joon. 133).

Näivtakistus määratakse järgmise valemiga:

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}.$$

Meid huvitab juht, kus ruutjuure aluse avaldise vahe $x_L - x_C = 0$ ja seega $z = r$.

Asendades avaldises $x_L - x_C = 0$ x_L ja x_C väärtused, saame:

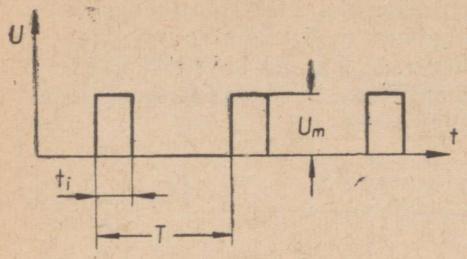
$$2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 0 \quad \text{või} \quad \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0.$$

Vajalik sagedus selle tingimuse täitmiseks

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Sellist sagedust nimetatakse resonantsisageduseks ja nähtust ennast resonantsiks.

Resonantsi puhul on mahtuvuslik ja induktiivne reaktiivtakistus võrdsed ja nende summaarne takistus null.



Joon. 134. Impulsspinge

Vool ahelas resonantsi puhul avaldub järgmiselt:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{r}.$$

Voolul ahelas on maksimaalne väärtus ja ta on suuruselt selline, nagu puuduks ahelas induktiivsus ja mahtuvus. Resonants leiab laialdast praktilist rakendamist raadiotehnikas.

I m p u l s s p i n g e j a i m p u l s s v o o l. Mõningatel juhtudel osutub otstarbekohaseks kasutada impulsspinget (näit. transistoride impulssparameetrite mõõtmisel). Joonisel 134 on toodud impulsspinge kuju. Impulsspinget iseloomustatakse järgmiste suurustega:

pinge amplituud U_m — pinge maksimaalne väärtus;

impulsi pikkust t_i — impulsi ajaline kestus;

impulsspinge periood T — ajavahemik kahe naaberimpulsi alguse vahel;

suhe $\frac{T}{t_i} = Q$ — hõrendus.

Toodud iseloomustussuurused on analoogilised ka voolu puhul.

11. MÕÕTMISTEHNIKA KÜSIMUSI

11. 1. ELEKTRIMÕÕTMISE PÕHIALUSED

Mõõtmisprotsess ja mõõtmisvead. Mõõtmisprotsess on mõõdetava suuruse võrdlemine suurusega, mis on võetud ühikuks.

Igal mõõtmisel esineb paratamatult mõõtmisviga. Mõõtmisel tuleb teada võimaliku tekkiva vea maksimaalset väärtust. Vea suurust teadmata on mõõtmise tulemus väärtusetu. Vigade hindamiseks on vaja tunda vigade liike.

Mõõteriista näidu ja suuruse tegeliku väärtuse vahet nimetatakse absoluutseks veaks:

$$\Delta A = A_n - A,$$

kus ΔA on absoluutne viga,
A_n — mõõteriista näit,
A — suuruse tegelik väärtus.

Absoluutne viga ei iseloomusta mõõtmise täpsust küllaldaselt. Paremini iseloomustab seda suhteline viga.

Absoluutse vea jagatist suuruse tegeliku väärtusega nimetatakse suhteliseks veaks. Suhtelist viga mõõdetakse tavaliselt protsentides:

$$\delta A = \frac{\Delta A \cdot 100}{A} = \frac{A_n - A}{A} 100\%,$$

kus δA on suhteline viga.

Mõõtmisel me tavaliselt ei tea suuruse tegelikku väärtust. Teada võib olla näiteks absoluutne viga. Sel juhul võib leida suhtelise vea:

$$\delta A = \frac{\Delta A}{A_n} 100\%.$$

Kuna mõõteriista näit A_n erineb tavaliselt väga vähe suuruse tegelikust väärtusest, on siinjuures tekkiv ebatäpsus suhtelise vea määramisel tähtsusetu.

Mõningate mõõteriistade korral (osutimõõteriistad, elektronmõõteriistad jne.) kasutatakse täishälbele taandatud vea mõistet. Täishälbele taandatud veaks nimetatakse absoluutse vea ja mõõtepiirkonna maksimaalse väärtuse A_m jagatist:

$$\delta_t = \frac{\Delta A}{A_m} 100\%.$$

Täishälbe puhul on suhteline ja täishälbele taandatud viga võrdsed.

Näide. Olgu voltmeetri skaala maksimaalne väärtus 10 V. Täishälbele taandatud viga on $\pm 1\%$. Leida voltmeetri suhteline viga näidu 5 V puhul.

Absoluutne viga

$$\Delta A = \frac{\delta t A_m}{100} = \frac{1 \cdot 10}{100} = 0{,}1 \text{ V}.$$

(δA avaldatud δ_t valemist.)

Suhteline viga 5 V puhul:

$$\delta A = \frac{\Delta A}{A} 100 = \frac{0{,}1}{5} \cdot 100 = \pm 2\%.$$

Seega poolel skaalal on suhteline viga 2 korda suurem kui taandatud viga.

Kui mõõta sellesama voltmeetriga pinget 1 V, on lubatav suhteline viga 10%.

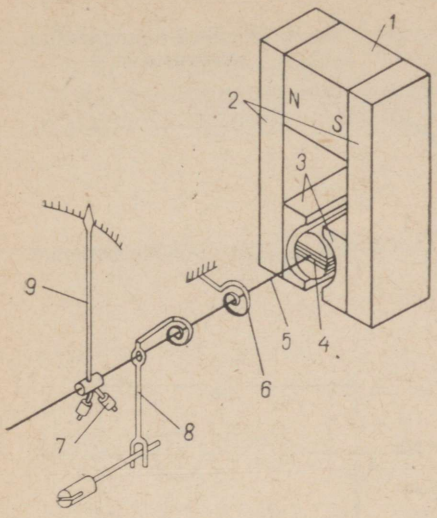
Seega oleneb suhteline viga mõõteriista hälbest ja on skaala algosas väga suur.

Siit tuleneb nõue, et *osutimõõteriistaga mõõtmisel tuleb valida selline piirkond, kus hälve oleks skaala viimases* $^2/_3$ *osas.*

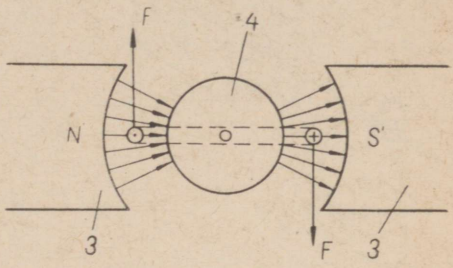
Mõõtmistel kasutatavate mõõteriistade täpsuse garanteerimiseks kontrollitakse neid perioodiliselt. Elektronmõõteriistadele liimitakse silt, millele on märgitud viimase kontrollimise ja järgmise kontrollimise kuupäevad. Kui järgmise kontrollimise kuupäev on möödunud, tuleb mõõtmine katkestada ja viia mõõteriist kontrollimisele. Tavaliselt plommitakse mõõteriistad pärast kontrollimist. Plommile on märgitud kontrollimise aasta või kvartal.

Mõõteriist loetakse kontrollimisel korrasolevaks, kui tema näidu erinevus tegelikust suurusest on lubatud mõõtmisvea piirides.

Magnetoelektriline osutisüsteem (joon. 135). Paljudes elektronmõõteriistades ja alalisvoolu otsesel mõõtmisel kasutatakse magnetoelektrilisi osutimõõteriistu. Magnetoelektriline osutimõõteriist koosneb püsimagnetist *1*, ikkest *2*, pooluskingadest *3*, pöörduvast ferromagnetilisest ainest südamikust ja sellele kinnitatud peenest vasktraadist mähitud raamist *4*, võllist *5*, vastumomendivedrust *6*, vastukaaludest *7*, korrektorisüsteemist *8*



Joon. 135. Magnetoelektriline osutimõõteriist



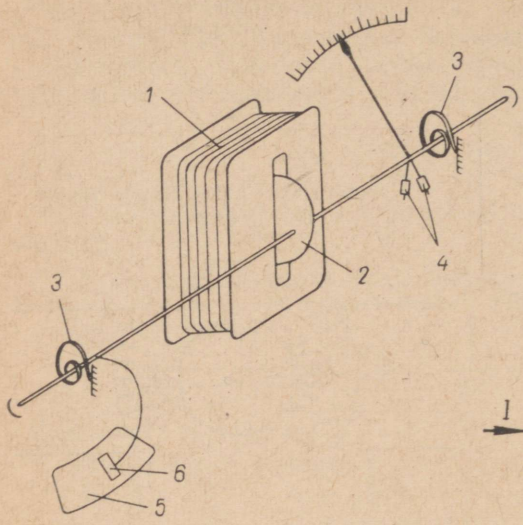
Joon. 136. Voolujuhtmele mõjuv jõud

ja osutist *9*. Vastukaalude ja korrektorisüsteemi abil tasakaalustatakse osuti voolu puudumisel näidule 0. Püsimagnet loob pooluskingade ja südamiku vahel ühtlase tugevusega magnetvälja. Selles magnetväljas paiknevad raami keerud. Mõõdetav vool juhitakse vastumomendivedrude kaudu läbi raami. Magnetväljas mõjub vooluga juhtmele jõud *F* joonisel 136 näidatud suunas. Jõud on seda tugevam, mida suurem vool läbib mähist. Selle jõu mõjul hakkab raam pöörduma. Raami pöördumist takistavad vastumomendivedrud, mis avaldavad seda suuremat takistavat jõudu, mida suurema nurga võrra pöördub raam. Raami teatud asendi puhul saab voolu poolt tekitatud jõud võrdseks vedrude vastumõjuga. Raami pöördenurk oleneb raami läbiva voolu tugevusest. Raami külge kinnitatud osuti näitab skaalal mõõdetud voolu väärtust. Magnetoelektriline osutisüsteem mõõdab ainult alalisvoolu. Vahelduvvooluahelasse lülitatuna näitab ta nulli.

Magnetoelektrilisi osutisüsteeme (tüüp M-24) kasutatakse näiteks transistoride parameetrite mõõteriistades.

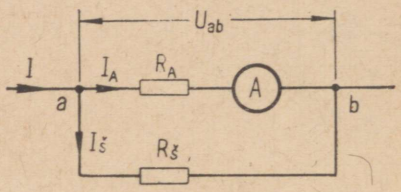
E l e k t r o m a g n e t i l i n e o s u t i s ü s t e e m. Elektromagnetiline osutisüsteem (joon. 137) koosneb paigalseisvast poolist *1*, osutiga ühele võllile kinnitatud ebasümmeetrilisest ferromagnetilisest materjalist südamikust *2*, vastumomendivedrudest *3*, vastukaaludest *4* ja pidurdussüsteemist *5* ning *6*.

Mõõdetav vool, läbides paigalseisvat pooli, tekitab magnetvälja, mis pöörab pooli sees asuvat osutiga ühendatud südamikku. Vastumomendivedru takistab pöördumist seda suurema jõuga, mida suurem on südamiku pöördenurk. Magnetvälja tugevus oleneb pooli läbiva mõõdetava voolu tugevusest. Osuti asendi määrab



Joon. 137. Elektromagnetiline osutisüsteem

Joon. 138. Šundi lülitamine



seega mõõdetava voolu tugevus ja skaalalt loeme mõõdetava voolu väärtuse. Pidurdussüsteemi kasutatakse osuti järskude tõugete vältimiseks.

Et pooli poolt tekitatud magnetvälja energia on võrdeline pooli läbiva voolu ruuduga I^2, on mõõteriista skaala ebalineaarne.

Elektromagnetilise osutisüsteemiga on võimalik mõõta nii alalis- kui ka vahelduvvoolu.

Vahelduvvooluahelasse lülitatuna näitab elektromagnetiline osutiriist vahelduvvoolu efektiivväärtust.

Tüüpilisemad elektromagnetilised osutimõõteriistad on ampermeetrid ACT ja voltmeetrid ACTB.

Peale vaadeldud osutisüsteemide kasutatakse veel elektrodünaamilisi, ferrodünaamilisi jt. osutiriistu.

P i i r k o n d a d e l a i e n d a m i n e v o o l u m õ õ t m i s e l. Osutisüsteemid ehitatakse tavaliselt nõrkade voolude mõõtmiseks (0,1 ... 10 mA). Tehnikas on aga vaja mõõta kuni sadadesse ampritesse ulatuvaid voolusid. Mõõtepiirkonna laiendamiseks kasutatakse sellisel juhul šunte. Šundi kasutamisel juhitakse osa voolu läbi šundi, osa läbi ampermeetri (joon. 138).

Ampermeetri ja šundi klemmidel on võrdne pinge U_{ab}. Voolud läbi šundi ja läbi ampermeetri avalduvad järgmiselt:

$$I_š = \frac{U_{ab}}{R_š}, \quad I_A = \frac{U_{ab}}{R_A},$$

kus $I_š$ on šunti läbiv vool,

I_A — ampermeetrit läbiv vool,
$R_š$ — šundi takistus,
R_A — ampermeetri sisetakistus (poolitraadi takistus).

Jagades esimese võrrandi teisega, saame:

$$\frac{I_š}{I_A} = \frac{R_A}{R_š} \quad \text{ja} \quad I_š = I_A \frac{R_A}{R_š}$$

Et tavaliselt $I_A \ll I_š$, siis $I \approx I_š$ ja

$$I \approx I_A \frac{R_A}{R_š}.$$

Vajalik šundi takistus

$$R_š = R_A \frac{I_A}{I}.$$

Täpne valem on

$$I = I_A \left(\frac{R_A}{R_š} + 1 \right)$$

ja šundi takistus

$$R_š = \frac{R_A}{\frac{I}{I_A} - 1}.$$

Näide: Leida šundi ligikaudne väärtus, kui on vaja mõõta voolu 100 mA osutisüsteemiga, mille täishälbele vastab vool 1 mA. Osutisüsteemi takistus $R_A = 100\ \Omega$.

Šundi suuruse leiame valemist

$$R_š = R_A \frac{I_A}{I} = 100 \cdot \frac{1}{100} = 1\ \Omega.$$

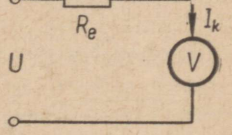
Kui ampermeetrit läbiv vool on 100 korda väiksem mõõdetavast voolust, siis peab ka šundi takistus olema sama arv korda väiksem ampermeetri sisetakistusest.

Laia voolupiirkonna mõõtmiseks kasutatakse mitme piirkonnaga ampermeetreid, mille piirkonda muudetakse šuntide ümberlülitamisega.

Pinge mõõtmine. Pinge mõõtmisel kasutatakse väikese nimivooluga mikro- ja milliampermeetreid (nimivool on vool, mis vastab mõõteriista täishälbele), millele lülitatakse ette kõrgeoomiline takisti (eeltakisti). Osutisüsteemi läbiv vool (joon. 139)

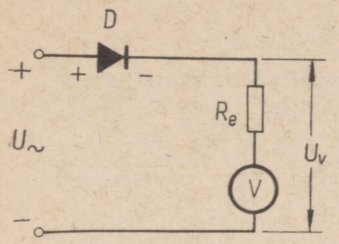
$$I = \frac{U}{R_e + R_A},$$

kus U on mõõdetav pinge,
R_e — eeltakisti,
R_A — ampermeetri sisetakistus.

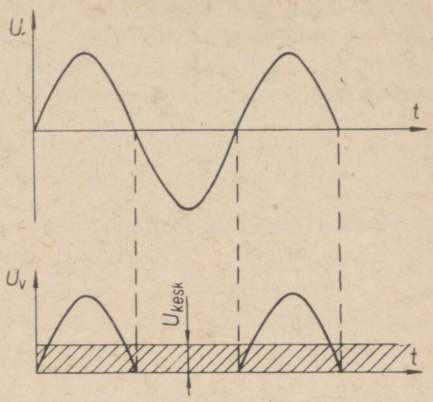


Joon. 139. Voltmeetri eeltakisti lülitamine

Seega on vool läbi osutisüsteemi võrde-



Joon. 140. Vahelduvpinge mõõtmine magnetoelektrilise osutisüsteemiga



Joon. 141. Pulseeriva pinge keskväärtus

line mõõdetava pingega U ja osutisüsteemi läbiva voolu järgi saame leida mõõdetava pinge väärtuse. Osutisüsteemi skaala võib gradueerida pingeühikutes.

Näide: Leida eeltakisti väärtus, kui mõõdetav pinge on 10 V. Kasutatava osutisüsteemi nimivool on 100 μA (10^{-4} A), sisetakistus $R_A = 1$ kΩ.

Eeltakisti

$$R_e = \frac{U}{I} - R_A = \frac{10}{10^{-4}} - 10^3 = 10^5 - 10^3 = 99\,000\ \Omega = 99\ \text{k}\Omega.$$

Laia pingepiirkonna mõõtmiseks kasutatakse mitme piirkonnaga voltmeetreid. Sobiva mõõtepiirkonna saamiseks lülitatakse voltmeeter vastavale eeltakistile.

Vahelduvpinge mõõtmine. Vahelduvpinge mõõtmiseks võib kasutada elektromagnetilise mõõtesüsteemiga voltmeetrit. Majanduslikel kaalutlustel kasutatakse tihti alaldiga varustatud magnetoelektrilist osutisüsteemi. Siinjuures alaldatakse vahelduvpinge detektori abil ja mõõdetakse saadud pulseeriva pinge keskväärtust.

Vahelduvpinge positiivsel poolperioodil (joon. 140) on diood D avatud ja vool läbib osutisüsteemi. Järgmisel poolperioodil on diood suletud ja vool puudub. Osutisüsteem näitab pulseeriva pinge keskväärtust (joon. 141). Kui mõõdetav pinge on siinuselise kujuga, võib skaala gradueerida pinge efektiivväärtuses.

Vajadus elektronmõõteriistade järele. Pinge mõõtmisel otsustatakse pinge üle osutisüsteemi läbiva voolu järgi. Järelikult läbib osa voolu voltmeetrit ja mõõdetava ahela vool väheneb selle võrra. Voolu vähenemise tõttu muutub pinge mõõ-

Joon. 142. Elektronvoltmeetri lahterskeem

detavas punktis. Voltmeetri mõju kõrvaldamiseks mõõdetavale ahelale kasutatakse elektronmõõteriistu, mille voolutarve mõõdetavast ahelast on tühiselt väike. Tüüpilise elektronvoltmeetri lahterskeem on toodud joonisel 142. Võimendil on väga kõrge sisendtakistus ja ta ei avalda mõju mõõdetavale ahelale.

Elektronmõõteriistade teise kasutusala tingib vajadus mõõta väga väikesi pingeid, millele osutisüsteem ei ole võimeline reageerima. Elektronvoltmeetris need pinged eelnevalt võimendatakse ja alles siis mõõdetakse osutiriista abil.

Mõningaid nõudeid mõõteriistade valikul ja mõõtmisel. Mõõteriist valitakse mõõdetava suuruse järgi. Siinjuures tuleb lähtuda mõõteriista passis toodud andmetest. Mõõdetav suurus peab olema kasutatava mõõteriista mõõtepiirkonnas. Enne mõõteriista ühendamist tuleb määrata, kas mõõteriist ei avalda liialt suurt mõju mõõdetavale ahelale ega põhjusta seetõttu suuri ebatäpsusi. Tuleb põhjalikult tutvuda mõõteriista kasutamise instruktsiooniga ja täita seal esitatud nõudeid. Enne mõõteriista ahelasse ühendamist tuleb mõõtepiirkondade ümberlüliti keerata suurimale mõõtepiirkonnale ja veenduda, et mõõteriist ühendatakse ettenähtud punktide vahele. Eriti ettevaatlik tuleb olla voolu mõõtmisel, kus vale ühendus võib mõõteriista rikkuda.

Voolu mõõtmiseks tuleb ampermeeter lülitada tarbijaga järjestikku, pinge mõõtmisel lülitatakse voltmeeter tarbija klemmidega paralleelselt.

Alles pärast hoolikat kontrollimist võib uuritava skeemi pingestada. Seejärel lülitatakse mõõteriistad suurimatelt piirkondadelt sobivatele piirkondadele. Mõõtmise tulemused registreeritakse katseprotokollidesse osuti näidu järgi. Kui skaala ei vasta otseselt mõõtepiirkonnale või pole gradueeritud mõõdetavates suurustes, tuleb esmalt registreerida osuti näit, seejärel määrata skaala konstant ja nende korrutisena kirjutada välja suuruse tegelik väärtus. Olgu näiteks kogu skaala jaotatud 150-ks. Ümberlüliti asub asendis 75 V. Osuti näitab 50 jaotust. Skaala konstant

$$c = \frac{\text{piirkond}}{\text{skaala jaotuste arv}}.$$

Antud juhul

$$c = \frac{75}{150} = 0{,}5.$$

Katseprotokoll tuleb täita vastavalt tabelile 5. Katseprotokollile tuleb lisada kasutatud mõõteriista nimetus, tüüp, tehase number ja täpsusklass, samuti mõõtmise kuupäev, mõõtja nimi ja allkiri.

Pärast mõõtmisi tuleb osutiriistad, millel on arretiir, arreteerida mõõtesüsteemi vigastuste vältimiseks transportimisel. Mõõteriistade ülejäänud piirkondade lüliti tuleb keerata instruktsioonis

Tabel 5

Jrk. nr.	Mõõteriista näit	Skaala konstant	Pinge U_v V
1	50	0,5	25

ettenähtud asendisse. Mõõteriistad tuleb paigutada selleks ettenähtud kappidesse riiulitele.

Transistoride parameetrite mõõtmiseks kasutatavate mõõteriistadega mõõtmisel tuleb enne mõõtmist tutvuda põhjalikult mõõteriista instruktsiooniga. Seejärel lülitatakse mõõteriist võrku, lastakse ettenähtud aja vältel soojeneda ja kalibreeritakse lauale kinnitatud tabeli alusel. Täpsust kontrollitakse etalontransistoridega. Esinevatest vigadest tuleb teatada meistrile.

On lubamatu mõõta mõõteriistaga, mille kontrollitähtaeg on möödunud.

Elektrilisi mõõtmisi võivad teha ainult isikud, kes on sooritanud ohutustehnika eksami töötamiseks kuni 500-V pingetega (erijuhtudel ka kõrgemate pingetega).

11.2. PIKKUSTE MÕÕTMINE

Tänapäeva tootmine esitab mitmesuguste esemete pikkuste määramisele kõrged nõuded. Peamisteks kasutatavateks mõõteriistadeks on joonlaud, nihik, indikaatorkell, kruvik ja kaliiber. Joonlauda kasutatakse suuremate pikkuste ligikaudseks määramiseks (täpsusega kuni $\pm$ 0,5 mm). Nihik on tööstuses kasutatavamaid vahendeid pikkuste mõõtmisel. Mõõtmise täpsus 0,02 ... 0,1 mm. Pikkuste mõõtmisel mingi baasi suhtes kasutatakse indikaatorkelli. Indikaatorkell on täpsem kui nihik (viga $\pm$ 0,015 mm). Ta on oma ehituselt keerulisem ja nõuab mõõtmisel ettevaatlikku käsitsemist. Täpsemaks, vahetult tootmises kasutatavaks pikkuste mõõtmise riistaks on kruvik. Kruvikuga saavutatav mõõtmistäpsus on $\pm$ 0,004 ... $\pm$ 0,01 mm olenevalt kruviku tüübist. Kruvikuga mõõtmisel tuleb enne mõõtmist puhastada mõõtepinnad puhta pehme lapiga ja kontrollida, kas kokkukeeratud kruvik näitab nulli.

Kaliibrit kasutatakse ainult ühe kindla mõõtme väga täpseks määramiseks.

Enne mõõtmisi tuleb tutvuda mõõteriistade kasutamise instruktsioonidega ja täita seal toodud nõuded.

Kõiki mõõteriistu tuleb perioodiliselt kontrollida. Kontrolli sagedus on määratud vastavalt mõõteriista tüübile ja mõõtmise vastutusrikkusele.

Iga mõõtja peab teadma tema poolt kasutatava mõõteriista kontrollimise sagedust.

Kontrollimata mõõteriistaga mõõtmisel tekkinud ebaõigete mõõtmistulemuste eest kannab vastutust mõõtja.

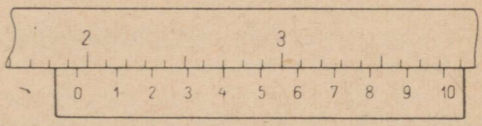
Möödunud kontrollitähtaegadega mõõteriistadest tuleb teatada Mõõtmistehnika Kesklaboratooriumi.

P i k k u s t e m õ õ t ü h i k u d. Pikkuse põhiühikuks on meeter. Tehnikas kasutatakse pikkuse peamise mõõtühikuna millimeetrit. Nii näiteks on kõik tehnilistel joonistel antud mõõtmed millimeetrites. Mõningate eriti täpsete mõõtmiste puhul antakse pikkus mikromeetrites.

Laialdasemalt kasutatavate pikkusühikute omavahelised seosed on järgmised:

1 meeter (m) = 100 sentimeetrit (cm)
1 sentimeeter (cm) = 10 millimeetrit (mm)
1 millimeeter (mm) = 1000 mikromeetrit (μm).

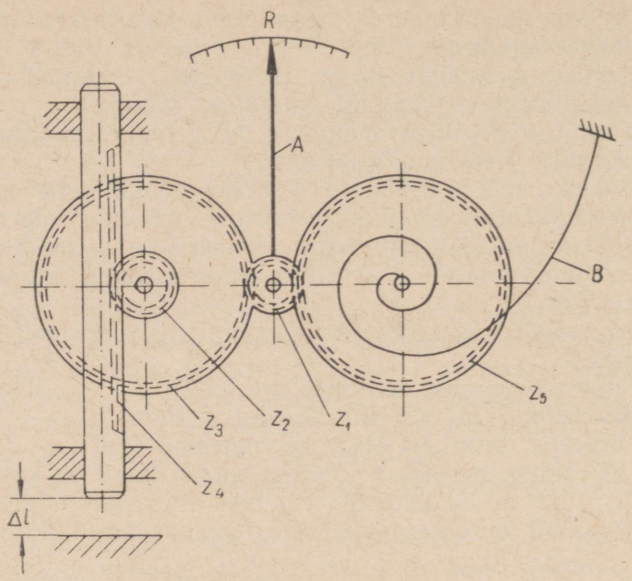
N i h i k. Nihik koosneb mõõtejoonlauast, kuhu on kantud põhiskaala, ja liikuvast nooniusega raamist, mis suurendab lugemise täpsust. Nihikult loetakse pikkust järgmiselt (joon. 143): millimeet-



Joon. 143. Nihiku skaala ja nooonius

rid määratakse nooniuse nullkriipsu järgi põhiskaalalt, sellele liidetakse niipalju kümnendikmillimeetrit, mitmes nooniuse kriips langeb ühte põhiskaala kriipsuga. Näiteks joonisel toodud pikkuse väärtus on 19,4 mm. Täpsematel nihikutel on nooniusel rohkem jaotusi. Lugem saadakse samal põhimõttel. Tüüpilised nihikud on ette nähtud pikkuste 0...125 mm ja 0...200 mm mõõtmiseks. Raami tagaküljele on mõningat tüüpi nihikutel kinnitatud kitsas mõõtevarras, mida saab kasutada sügavuse mõõtmiseks.

I n d i k a a t o r k e l l. Indikaatorkella kasutatakse pikkuse ja paksuse täpseks mõõtmiseks. Mõõtepiirkond 0...10 mm, jaotuste vahe 0,01 mm. Indikaatorkell töötab järgmiselt (joon. 144). Mõõtmisel liigub hammaslatt Z_4 mõõdetava pikkuse Δl võrra ülespoole, pannes pöörlema väikese hammasratta Z_2. Hammasrattaga Z_2 on jäigalt kinnitatud suure hammaste arvuga hammasratas Z_3, mis omakorda annab pöörlemise üle hammasrattale Z_1. Hammasratta Z_1 külge on kinnitatud osuti A, mis pöördub mõõdetavale pikkusele vastavate jaotuste võrra. Lugem võetakse skaalalt R. Et pärast mõõtmist tuleksid hammaslatt Z_4 ja osuti A tagasi algseisundisse, on kasutatud vastumomendivedruga B ühendatud hammasratast Z_5. Pikkusele 1 mm vastab osuti 1 pööre. Skaala on jaotatud 100-ks. Kui osuti teeb mõõtmisel mitu pööret (üle



Joon. 144. Indikaatorkella tööpõhimõte

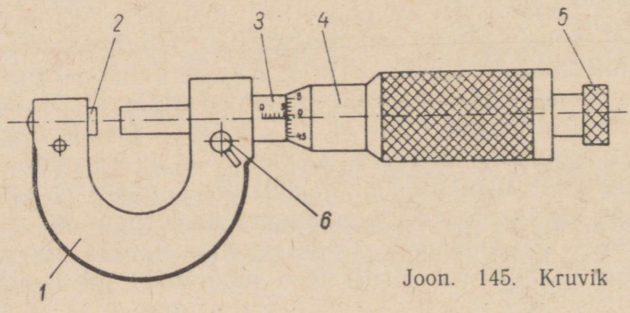
1 mm pikkuste esemete mõõtmisel), registreeritakse pöörete arv pöörete arvu lugeva osuti poolt.

Kogu mõõteulatuses on mõõtmisviga väiksem kui 0,015 mm.

K r u v i k. Kruvik koosneb loogast *1*, liikumatust kannast *2*, mikromeetrikruvist *3*, skaalaga käepidemest *4*, käristist *5* ja fiksaatorist *6* (joon. 145).

Käepideme iga täispöördega liigub mikromeetrikruvi 0,5 mm võrra. Käepideme välisümbermõõt on jaotatud 50 osaks. Seega käepideme pööramisel 1 jaotuse võrra nihkub pöörlev osa 0,01 mm.

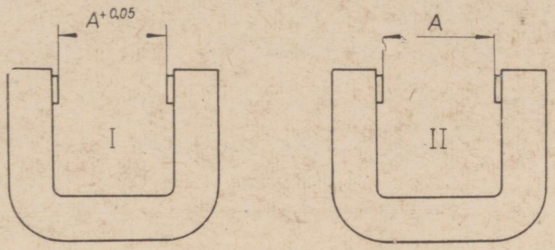
Kruvikuga mõõtmisel asetatakse mõõdetav ese kanna ja mikromeetrikruvi otsa vahele (eelnevalt tuleb kontrollida kruviku nulli). Käristi abil keeratakse aeglaselt kruviku käepidet seni, kuni ese



Joon. 145. Kruvik

on tihedalt haaratud ja käristi lakkab pöörlemist edasi andmast (käristi peab viskama üle 3 hammast). Eseme haaramisel tuleb kruvikut keerata tingimata käristist, millega keeramise maksimaalne pöördemoment on piiratud. Käepidemest keeramisel võib kruvik mõõdetavat eset deformeerida, millega saadakse vale mõõtmistulemus.

Kruviku käepidemele on kantud täis- ja poolmillimeetrid. Mõõtmisel loetakse täis- ja poolmillimeetrid otse käepidemelt ja liide-



Joon. 146. Pikkuse kaliiber

takse sellele nii palju sajandikmillimeetreid, kui mitu jaotust on pööratud kruviku käepidet, arvestades viimasest täispöördest.

Kasutatavamate kruvikute mõõtepiirkond on 0 . . . 25 mm.

K a l i i b e r. Tootmises on vaja määrata mingi detaili ühte mõõdet väga suure täpsusega palju kordi. Sellise mõõtme kontrollimiseks kasutatakse kaliibrit. Kaliiber võib määrata mõõtme ülevalt, alt või mõlemalt poolt. Näiteks on mõõde määratud mõlemalt poolt, kui I kaliibri avasse detail mahub, II avasse aga mitte (joon. 146). Seega on detaili mõõde nende kahe kaliibri ava mõõtmete vahel $(A + 0{,}05)$.

Kaliibrit kasutatakse seeriatoodangu puhul suure arvu toodete mõõtmisel.

SISUKORD

Sissejuhatus 3

1. Pooljuhtide teooria põhialused

1. 1. Aatomi ehitus 5
1. 2. Tahke aine ehitus 8
1. 3. Elektrijuhtivus pooljuhtides 13
1. 4. *p-n*-siire 21

2. Pooljuhtseadised

2. 1. Pooljuhtdioodid 26
2. 2. Transistorid 31
2. 3. Türistorid 40
2. 4. Teisi pooljuhtseadiseid 42

3. Põhimaterjalid

3. 1. Germaanium (Ge) 47
3. 2. Räni 49
3. 3. Teised pooljuhtmaterjalid 51
3. 4. Aktseptorlisandid 52
3. 5. Doonorlisandid 52
3. 6. Elektrood- ja jootesulamite komponendid 53
3. 7. Lakid ja värvid 54
3. 8. Vaigud, vahad ja plastmassid 55
3. 9. Materjalid *p-n*-siirdeid kaitsva keskkonna loomiseks 56

4. Tehnoloogilised abimaterjalid

4. 1. Gaasid 57
4. 2. Vesi 60
4. 3. Happed, alused ja soolad 62
4. 4. Grafiit 65
4. 5. Kvarts 66

5. Pooljuhtmaterjalide mehaaniline töötlemine

5. 1. Abrasiivmaterjalid 67
5. 2. Valandi ettevalmistamine 68
5. 3. Valandi lõikamine 69
5. 4. Plaatide lihvimine 70
5. 5. Plaatide sorteerimine ja praagi liigid 71
5. 6. Ultraheli 71

6. Materjalide keemiline töötlemine

6. 1. Pooljuhtmaterjalide keemiline töötlemine 75
6. 2. Metallide galvaaniline katmine 79

7. *p-n*-siirete valmistamise viise

7. 1. Sulatamismeetod 85
7. 2. Monokristallide kasvatamise meetod 87
7. 3. Difundeerimismeetod 88
7. 4. Sulandamis-difusioonimeetod 90
7. 5. Fotolitograafiline meetod 91
7. 6. Epitaksiaalkilede kasvatamine 92
7. 7. *p-n-p-n*-struktuuride saamine 93
7. 8. Termilise töötlemise seadmed 94
7. 9. Vaakuumitehnika 100

8. Transistoride montaaž

8. 1. Transistoride konstruktsioonielemendid 107
8. 2. Tähtsamad koostamisoperatsioonid 109
8. 3. Jootmine 110
8. 4. Keevitamine 113
8. 5. Külmkeevitus 116
8. 6. Termokompressioon 117
8. 7. *p-n*-siirete kaitsmine 118

9. Pooljuhtseadiste parameetrid ja nende mõõtmine

9. 1. Parameetrite mõõteaparatuur 119
9. 2. Transistori alalisvooluparameetrid 120
9. 3. Transistori madalsagedusparameetrid 122
9. 4. Transistori kõrgsagedusparameetrid 127
9. 5. Transistori impulssparameetrite mõõtmine 130
9. 6. Türistori parameetrite mõõtmine 132
9. 7. Pooljuhtseadiste katsetamine 134

10. Alalis- ja vahelduvvoolu põhimõisted

10. 1. Alalisvool 139
10. 2. Vahelduvvool 146

11. Mõõtmistehnika küsimusi

11. 1. Elektrimõõtmise põhialused 153
11. 2. Pikkuste mõõtmine 160

Э. Линнас, Э. Таасвяли, Х. Рюютельмаа, Л. Михкла, А. Рямметь, В. Алувээ, В. Крист, А. Ваппер. ПРОИЗВОДСТВО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ. На эстонском языке. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10.

*

Toimetaja J. Ristoja. Kunstiline toimetaja R. Kelu. Tehniline toimetaja A. Muna. Korrektorid H. Kull ja M. Pall. Laduda antud 6. V 1968. Trükkida antud 12. III 1969. Kohila Paberivabriku trükipaber nr. 2, 60×90/16. Trükipoognaid 10,5. Arvestuspoognaid 10,29. Trükiarv 1000. MB-03103. Tellimuse nr. 2976. Hans Heidemanni nim. Trükikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. II.

Hind 51 kop.

Kontrolleksemplar

51 kop.

A
29722
74017

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00403268 8