

M. SOMINSKI

POOLJUHD  
JA NENDE  
KASUTAMINE

2/40771

A-21193 III

M. SOMINSKI

POOLJUHID  
JA  
NENDE KASUTAMINE



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS  
TALLINN 1956

Originaali tiitel:

М. С. Соминский

Полупроводники и их применение

Госэнергоиздат 1955

Tõlkinud H. Lepikson

Raamatus käsitletakse pooljuhtide põhiomadusi ja pooljuhtdiodide, -trioodide, fototakistite, fotoelementide ning termotakistite ehitust ja töötamist. On toodud näiteid nende praktilisest kasutamisest.

Raamat on mõeldud ettevalmistatud raadioamatööridele.

2

Tartu Riikliku Olikooli  
Raamatukogu

40441

## SISSEJUHATUS

Iga aastaga omandavad pooljuhid üha suuremat tähtsust teaduses, tehnikas ja rahvamajanduses. Võib öelda, et käesoleval ajal ei esine ühtegi tehnikaharu, kus pooljuhte ei kasutataks.

Pooljuhtide kasutuselevõtmine on võimaldanud lahendada sääraseid probleeme, mida varem, vanade tehniliste vahenditega, kuidagi lahendada ei saadud. Teiselt poolt aitas pooljuhtide igakülgne uurimine püstitada tahkete kehade ühtse, elektroonse teooria ja avastada ning mõista rea üldisi seadusepärasusi. Akadeemik A. F. Joffe tabava ütluse järgi moodustavad pooljuhid peaaegu kogu meid ümbritseva anorgaanilise maailma. Tõepoolest, pooljuhtide hulka kuulub suurem osa metallide oksüüde ja nende väävelühendeid, mõned seleniidid ja rida metallide binaarseid sulameid. Sääraseid ained nagu grafiit, seleen, germaanium, räni ja telluur on samuti pooljuhid. Paljud metallide kaksiksulamid käituvad ilmselt pooljuhtidena.

Pooljuhtide kasutamisele on rajatud kümneid tüüpe aparate, mis täidavad suuri ja mitmekülgseid ülesandeid. Pooljuhtseadiste abil muundatakse vahelduvvool alalisvooluks, kaitstakse elektriline liigpingete eest, transformeeritakse teatava spektraalse koostisega valgus teistsuguse koostisega valguseks. Nende abil muundatakse soojusenergia vahetult elektrienergiaks, võimendatakse elektrilisi võnkumisi, «toodetakse» külma erilistes külmutusseadmetes ja loendatakse automaatselt aatomituuma osakesi. Pooljuhtseadiste abil saab võimalikuks ka akustilise energia muundamine elektrienergiaks.

Mõned pooljuhtivad ühendid osutuvad suurepärasteks katalüsaatoriteks ja neid kasutatakse edukalt reas keemiatööstuse harudes.

Pooljuhtidest fotoelemendid, fototakistid, termoelektrigeneraatorid, termotakistid, alaldajad, diodid ja triodid,

luminofoorid ja teised pooljuhtivad seadised ning materjalid on laialdaselt levinud ja saavutanud üldise tunnustuse.

Piiramatud võimalused, mis peituvad pooljuhtides, paelusid füüsikute ja tehnikute tähelepanu. Vaevalt 25 aastat kestnud pingelised uurimistööd pooljuhtide füüsika valdkonnas on andnud juba nii teooria kui ka praktika jaoks tõsiseid tulemusi. Pooljuhtide praktilise rakendamise alal tehti eriti tähtsaid edusamme sõjajärgseil aastail. Viimase 10 aasta jooksul on märgatavalt täiustatud juba varem olemasolevaid pooljuhtseadiseid, on leiutatud uusi ja tunduvalt laiendatud nende kasutusala.

Mida kujutavad endast pooljuhid ning mille poolest nad erinevad elektrijuhtidest ja mittejuhtidest (dielektrikutest)? Vastus sellele küsimusele ei saa olla lühike ega lihtne. Selleks et mõista selle aineterühma füüsikalist olemust, tuleb eelkõige lühidalt tutvuda pooljuhtide teooria põhialustega. Need andmed, mis on vajalikud kogu järgneva materjali mõistmiseks, on esitatud käesoleva raamatu esimeses peatükis. Kõik ülejäänud peatükid on pühendatud pooljuhtseadiste ning -materjalide kirjeldustele ja nende rakendamisele tehnikas.

Tuleb märkida, et nõukogude teadlased on omalt poolt andnud väärtusliku panuse pooljuhtide uurimisel. Arvukas rühm nõukogude füüsikuid töötab intensiivselt selle suhteliselt noore füüsikaharu edasisel süvendamisel ja laiendamisel. «Pooljuhte ja nende rakendusi käsitleva õpetuse arengutempo,» ütleb akadeemik A. F. Joffe, «näitab selgesti, et meie seisame alles selle pika teekonna alguses, mis peab viima energaetika, automaatika, raadiotehnika ning mõõte- ja valgustustehnika märksa kõrgemale tasemele. Õpetus pooljuhtidest on kaasaegse füüsika ja tehnika üks eesrindlikumaid ja progressiivsemaid harusid.»

---

## ESIMENE PEATÜKK

### POOLJUHTIDE ELEKTRILISED OMADUSED

#### KRISTALLVÕRE

1895. aastal avastas Wilhelm Konrad Röntgen kiired, mis hiljem nimetati röntgenikiirteks. See silmapaistev avastus andis teadlaste kätte võimsa vahendi looduse uurimiseks, mis võimaldab tungida sügavale aine ehituse saladustesse ja selgitada kristallide struktuuri.

Juba XVIII sajandi lõpul püstitati hüpotees, mis püüdis selgitada kristalliliste ainete esinemise suurt mitmekesisust looduses. Kuid ühtegi kindlat eksperimentaalset kinnitust sellel hüpoteesil ei olnud. Olukord muutus järjult alles 1912. aastal, mil kaks noort füüsikut Friedrich ja Knipping tegid eksperimendi, mis selgitas röntgenikiirte olemuse. Sama eksperiment näitas, et röntgenikiirte abil on võimalik uurida kristalliliste kehade ehitust.

Inglaste W. H. Bragg'i ja W. L. Bragg'i (isa ja poeg) ning Moskva teadlase G. V. Vulf'i töödest selgus, et röntgenikiired võimaldavad määrata kristallide struktuuri väga täpselt ja üksikasjaliselt.

Looduses kõige mitmekesisemal kujul esinevatest tahketest kehadest on suurem osa kristallilise ehitusega. Mille poolest erineb kristalliline keha amorfset (s. o. kristallilist ehitust mitteomavast) kehast? Välistunnuste järgi erinevad kristallid amorfsetest kehadest oma kuju poolest, olles reeglipäraselt piiratud loomulikkude tasapinnaliste tahkudega, mis omavahel teatavate nurkade all lõikuvad. Seetõttu on igal kristallil hulktahuka kuju, milledest lihtsaimaks on kuup.

Amorfsete kehade füüsikalised omadused ei sõltu suunast. Näiteks kui lõigata valatud klaasist välja mingisuguse kujuga tükikene (olgu see näiteks püsttahukakuju-

line) ja seejärel mõõta selle elektrilist erijuhtivust, dielektrilist läbitavust, soojusejuhtivust, murdumisnäitajat või mistahes muud füüsikalist suurust algul piki püst-tahuka üht, siis teist ja lõpuks kolmandat telge, siis võime veenduda selles, et mõõtmistel saadud tulemused on omavahel identsed. Seda amorfsete kehade omadust nimetatakse isotroopsuseks ja kehi, millede füüsikalised omadused ei sõltu suunast — isotroopseteks.

Sootuks teistsugune pilt avaneb siis, kui vaadelda kristalle. Erinevalt amorfsetest kehadest on kristallid anisotroopsed. See tähendab, et kristallide mõned füüsikalised omadused sõltuvad suunast. Loomulikult on erinevatel kristallivormidel anisotroopsuse aste erinev. Kõige väiksema anisotroopsusega on kuubikujuline kristall. Enamiku kristallide puhul avaldub anisotroopsus kõige teravamalt just nende mehaaniliste omaduste juures.

Erinevalt amorfsetest kehadest sulavad kristallid teatava täpselt määratud temperatuuri juures, üle minnes vedelasse olekusse.

Nii ülalnimetatud kui ka teised kristallide omadused seletuvad nende struktuuri iseärasustega. Kristallidel on korrapärane sisemine ehitus. Aineosakesed — aatomid, ioonid või molekulid, milledest kristall on ehitatud, moodustavad korrapärase ruumilise võre. Selline võre saadakse kolme tasapindade süsteemi lõikumisel. Iga süsteemi iseloomustab seejuures asjaolu, et kõik teda moodustavad tasapinnad on omavahel paralleelsed ja asuvad üksteisest võrdsetel kaugustel.

Kristalle moodustavad osakesed paiknevad ruumilise võre sõlmedes. Nende osakeste (molekulide, aatomite või ioonide) termiline liikumine avaldub ainult ümber sõlm-punktide toimivas võnkumises. Ruumilise võre sõlm-punktid on seega termilise võnkeliikumise tsentriteks. Kui termilist liikumist mitte arvestada, siis võib öelda, et kristalli moodustavad osakesed on kinnitatud ruumilise võre sõlmedesse.

Juba 1885. aastal, seega mitu aastat enne röntgenikiirte avastamist, näitas tuntud Peterburi kristallograaf E. S. Fjodorov sügava teoreetilise analüüsi põhjal, et kõigil looduses esinevatel kristalliliikidel on kokku 230 erinevat sümmeetriavormi. Kristallide ehituse röntgenostruktuuriline uurimine kinnitas hiljem täielikult E. S. Fjodorovi järeldusi.

Kristalli moodustumise protsessis tekkiva võre iseloom, s. t. tema tüüp, sõltub kristalli moodustavate aineosakeste vahel mõjuvate jõudude iseloomust. Asjaolu, et kõikide kristallide sisemine ehitus on korrapärane, seletub sellega, et antud iseloomuga sidejõudude puhul vastab säärane struktuur potentsiaalse energia miinimumile. Sel puhul on võre püsivas tasakaalus. Iga konkreetse kristalli kuju, järelikult ka võre tüüp, on seega määratud puhtenergeetiliste vahekordadega. Kui kõik teised tingimused on võrdsed, siis kujutab kristall endast säärast tahket keha, milles teda moodustavad aineosakesed on kõige tihedamalt ja otstarbekamalt «ära mahutatud». Arusaadavalt võib erinevate kristallide juures mahutamistihedus olla isesugune.

Olenevalt aineosakestest, milledest kristall on ehitatud, eristatakse molekul-, aatom-,ioon- ja metalli kristallvõresid.

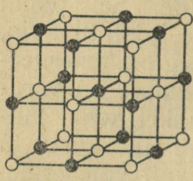
Aatomvõred tekivad sel juhul, kui kristalli moodustavad aatomid seotakse nn. elektronipaaridega. Elektronipaari all tuleb mõista kahte säärast tuumade ümber liikuvat elektroni, millel on ühesugune energia, kuid vastupidiselt suunatud magnetilised momendid. Iga elektroni võib vaadelda kui väikest magnetit, millel on oma magnetiline telg. Seega on tuumade ümber liikuvate ja elektronipaare moodustavate elektronide magnetilised teljed teineteisega paralleelsed, kuid nende samanimelised poolused on seejuures suunatud vastupidiselt. Vaatleme lihtsuse mõttes vesiniku molekuli  $H_2$ . Vesiniku iga aatom koosneb tuumast ja ühest selle ümber pöörlevast elektronist. Kui kaks vesinikuaatomi ühinevad molekuliks, siis hakkab ümber mõlema tuuma sümmeetriliselt liikuma kaks elektroni. Need, tuumade poolt külgetõmmatud elektronid nagu seoksid tuumi ega võimalda neil lahku minna. Teistes molekulides võib säärane ühendus olla teostatud kahe, kolme ja isegi nelja elektroni-paari poolt.

Ioonvõred on moodustatud võre sõlmpunktidesse kinnitunud erineva polaarsusega ioonidest. Ioonkristallide näidetena võib tuua keedusoola ( $NaCl$ ), kloorseesiumi ( $CsCl$ ) ja teisi ühendeid. Ioonvõre sõlmedes paiknevad vaheldumisi metalli positiivsed ja metalloidi negatiivsed ioonid. Ioone seovad elektrostaatilised jõud, mis vastavad Coulomb'i seadusele.

Joonisel 1 on näidatud naatriumkloriidi ( $NaCl$ ) võre skeem. Mustade kerakestega on siin tähistatud naatriumi ioonid ( $Na^+$ ) ja valgetega — kloori ioonid ( $Cl^-$ ). Jooni-

selt on näha, et iga naatriumi ioon on ümbritsetud kuuest kloori ioonist ja vastupidi, iga kloori ioon — kuuest naatriumi ioonist.

Ioone omavahel siduvate vastastikuste tõmbejõudude suurusel olenevad kristalli säärased omadused nagu



Joon. 1. Naatriumkloriidi (NaCl) kristallvõre.

kõvadus, lahustuvus ja sulamistäpp. Mida suuremad on ioonidevahelised tõmbejõud, seda kõrgem on kristalli sulamistäpp ja seda suurem on tema kõvadus. Tõepoolest, sulamise füüsikaline olemus seisab kristalli moodustavate osakeste vahel mõjuvate sidemete purustamises. Mida tugevamad need on, seda suuremat energiat tuleb nende ületamiseks kulutada ja seda kõrgema temperatuurini tuleb kristalli kuumutada. Sellelt seisukohalt lähtudes saab mõistetavaks ka kristallide omadus

vedelikes lahustuda, sest lahustumine pole samuti midagi muud, kui ioonidevaheliste sidemete purustamine. Järelikult, mida suuremad on võre ioonide vahel mõjuvad vastastikused tõmbejõud, seda vähemal määral on kristall lahustuv.

Metalli ruumilise võre sõlmpunktides asuvad ainult metalli positiivsed ioonid. Positiivsete ioonide vahel ei toimi vastastikused tõmbejõud, vaid mõjuvad hoopis tõukejõud. Seetõttu näib, et säärane võre peaks lagunema, mida aga tegelikult ei juhtu. See, esimesel pilgul arusaamatu fakt seletub sellega, et metallis leidub vabu elektrone. Koosmõjus positiivsete ioonidega tagavad vabad elektronid metalli võre püsivuse, ei lase sellel laguneda ega saa ka ise sellest kergesti väljuda.

Molekulvõre sõlmedes on molekulid üksteisega seotud suhteliselt nõrkade jõudude abil, millede toime on samuti seletatav elektrilise külgetõmbega. Mainitud külgetõmme võib tekkida kahel juhul. Esimene juht leiab aset siis, kui molekul on elektriliselt ebasümmeetriline. See tähendab, et kuigi molekul tervikuna on elektriliselt neutraalne, on tema positiivsete ja negatiivsete laengute raskuskeskmed teineteise suhtes nihutatud. Teatava vastastikuse orientatsiooni puhul hakkavad säärased molekulid teineteist külge tõmbama.

Teisel juhul võib molekulide vahel tekkida külgetõmbe-

jõud isegi siis, kui need, olles oma loomult muidu mitte-polaarsed, polariseeruvad üksteisele küllaldase lähendamise korral. Nagu esimeselgi juhul, tekib siin polaarsus selle arvel, et molekuli positiivsete ja negatiivsete laengute raskuskeskmed teineteise suhtes nihkuvad. Molekulaarvõre esineb jää ja rea orgaaniliste ainete kristallide juures.

Säärased on kõige üldisemates joontes põhilised kujutelmad kristallvõrede struktuuri ja neis esinevate sidemete kohta. Vaadeldud sidemetüübid kujutavad endast piirjuhtumeid. Reaalsetes kristallides esineb ka kõiki vahepealseid sidemetüüpe.

### KRISTALLIDE ELEKTRIJUHTIVUS

Selgitame elektronpooljuhtide elektrijuhtivuse füüsikalise olemuse.

Selleks meenutame, et mistahes aine aatom kujutab endast süsteemi, mis koosneb positiivselt laetud tuumast ja selle ümber tiirlevatest elektronidest. Iga elektroni laeng  $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$  CGSE-ühikut. Neutraalsetes aatomites võrdub elektronide kogulaeng tuuma laenguga. Aatomi elektronide arv on võrdne tema positsiooninumbriga Mendelejevi perioodilises süsteemis. Iga aine aatomites jaotuvad elektronid nagu teatavatesse kihtidesse, moodustades elektronkatted. Seejuures on iseloomustav, et igasse elektronkattesse mahub ainult teatav, täpselt määratud hulk elektrone. Esimene, s. t. tuumale kõige lähemal asuv kate  $K$  võib mahutada ainult kaks elektroni; teine kate, mida tähistatakse tähega  $L$ , mahutab kaheksa, kolmas,  $M$ -kate mahutab 18, neljas,  $N$ -kate — 32 elektroni jne. Elektronkatted ei ole aga mitte kõikides aatomites täidetud selle elektronide hulgaga, mida nad mahutada suudaksid. Kõige sagedamini on osaliselt täidetud välimised katted. Näiteks liitiumi aatomisse kuulub kolm elektroni, milledest kaks asuvad esimeses, ja üks teises kattes. Liitiumi aatomi teises kattes puudub järelikult seitse elektroni. Lämmastiku aatomis on kokku seitse elektroni. Esimeses kattes on kaks, teises — viis elektroni. Seega võiks teine kate mahutada veel kolme elektroni.

Iga elektron omab teatavat energiat. Sealjuures ei saa aatomi koostisse kuuluvatel elektronidel olla energiat meelevaldsel hulgal, vaid nad võivad olla ainult «lubatud» ener-

giaastmel (energeetilises seisundis). Aatomi kõik elektronid on jaotatud rangelt määratud energiaastmete, või nagu veel öeldakse, «nivoode» järgi. Teatud tingimustes võib elektron üle minna ühelt energianivoolt teisele, samuti «lubatud» nivoole, kuid ei saa asuda mingisugusesse vahepealsesse, «keelatud» seisundisse.

Teooria ja katsed näitavad, et aatomis ei saa olla üle kahe ühesuguse energeetilises seisundis oleva elektroni. Ka kõige keerulisema ehitusega aatomis on seetõttu kõik elektronid jaotatud oma energianivoode järgi. Kuna elektronid on külgetõmbejõudude kaudu aatomituumaga seotud, siis selleks, et tagada elektroni üleminek madalamalt energianivoolt kõrgemale, tuleb elektronile energiat väljastpoolt juurde anda. Vastupidisel üleminekul, s. t. kõrgemalt nivoolt madalamale nivoole siirdumisel kaotab elektron energiat. Et elektronid võivad aatomis paikneda ainult teataval, täielikult määratud energianivoodel ega saa asuda vahepealsetel, «keelatud» nivoodel, toimub nii energia kaotamine elektroni poolt kui ka selle juurdesaamine mitte pidevalt, vaid hüppeliselt.

Elektroni siirdumisel kõrgemalt energianivoolt madalamale kiiratakse välja üks kvant valgust. Vastupidi, valguskvantide neelamisega aine aatomite poolt kaasub elektronide üleminek kõrgematele nivoodele.

Rida eksperimentaalselt saadud tulemusi näitab, et valgust kiiratakse ja neelatakse mitte pideva vooluna, vaid üksikute annustena. Viimaseid nimetatakse füüsikas valguse kvantideks ehk footoniteks. Footon on kiirguse elementaarannuseks. Valgusvool on järelikult mittepidev struktuur ja ta koosneb ülisuurest footonite hulgast. Teiselt poolt on igale kiirgusele omane ka laine-iseloom, mis ilmneb seda teravamalt, mida madalam on sagedus. Kiirgusel on seega üheaegselt nii laine- kui ka kvantne iseloom, kusjuures teataval juhtudel (kõrge sageduse puhul) on kergem täheldada kvantset iseloomu ja teistel (madala sageduse puhul) — laine-iseloomu.

Elektron, asudes nivool, mida tinglikult tähistatakse numbriga 2, omab energiat  $W_2$ . Madalamal, numbriga 1 tähistatud nivool asudes on tema energia  $W_1$ . Elektroni siirdumisel nivoolt 2 nivoole 1 kiirgab aatom välja footoni, mille energia

$$\varepsilon = W_2 - W_1.$$

Kaasaegse teaduse poolt on kindlaks tehtud, et valguse võnkesageduse ja footoni energiahulga vahel esineb range, kõikjal kehtiv seos. Mida kõrgem on kiiritava valguse sagedus, seda suurem on footoni energia, ja vastupidi, footoni energia väheneb koos sageduse langemisega. Valem

$$\epsilon = h \nu$$

väljendab seda seost. Valemis tähistab  $\nu$  valguse sagedust ja  $h$  — konstanti, mida nimetatakse Plancki konstandiks ja mis võrdub  $6,62 \cdot 10^{-27}$  erg sec.

Kui aatomid asuvad üksteisest suhteliselt suurte kaugustel (näiteks hõrendatud gaasis), siis nende elektriväljad praktiliselt naaberaatomitele ei mõju. Hoopis teistsugune pilt avaneb meile aga tahkete kehade juures. Kristallides paiknevad aatomid korrapäraselt ja asuvad üksteisele küllalt ligidal. Seetõttu mõjutavad naaberaatomite väljad üksteist. Selle tulemusel aga kujuneb kristallivõres perioodiline elektriväli. Ideaalsel (lisanditevabal), absoluutselt korrapärase võrega kristallil peaks olema rangelt perioodiline elektrostaatiline väli. Looduses aga ideaalseid kristalle tegelikult ei esine, mistõttu välja perioodilisus on kristalli üksikutes kohtades tavaliselt rikutud.

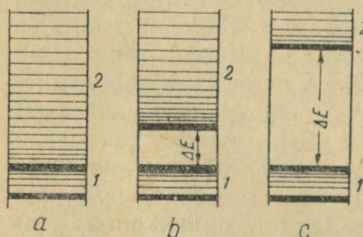
Nagu eespool selgitati, esinevad isoleeritud aatomis energianivood, kusjuures igaühel neist võib paikneda kuni kaks elektroni. Kui  $N$  säärast aatomit lähenevad üksteisele väikestele kaugustele ja moodustavad tahke kristallilise keha, siis üksikute aatomite väljad liituvad ning tekib perioodiline väli. Naaberaatomite vastastikuse mõju tulemusel laguneb aatomite iga üksik energianivoo suuruselt üksteisest vähe erinevateks, kuid siiski iseseisvateks kristalli energianivodeks, millede arv võrdub aatomite arvuga kristallis. Ka kristalli igal energianivool võib asuda ainult kaks elektroni. Tekkinud  $N$  nivood moodustavad energiavööndi ehk energiatsooni. Energiatsoonid on üksteisest eraldatud energia-aladega, kus ei saa olla elektrone. Neid alasid nimetatakse keelatud tsoonideks. Absoluutsele nullile lähedasel temperatuuril asuvad pooljuhi kõik elektronid kõige madalamatel energianivoodel. Sellel temperatuuril vahelduvad elektronidega täielikult täidetud lubatud nivoo tsoonid tühjade keelatud tsoonidega.

Aatomituumadele kõige lähemal asuvad elektronid on oma tuumadega nii tugevasti seotud, et nad ei saa osa

võtta elektrijuhtivusest. Viimane on põhjustatud ainult nn. valentselektronide, s. t. aatomi kõige välisemate elektronide poolt, millede energia on seejuures aga kõige suurem.

Samuti kui sügavamal paiknevad elektronid, asuvad ka valentselektronid absoluutsele nullile lähedasel temperatuuril oma madalaimatel põhiniivoodel. Kuid lisaks põhiniivoodele on pooljuhtide kristallides olemas veel nn. ergastusnivood, millede energia on põhiniivoodele vastavast energiast suurem. Elektronid võivad siirduda põhiniivoodelt ergastusnivoodele ainult sel juhul, kui neile antakse selleks vajalik lisaenergia.

Vaatleme tahke keha energiatsoonide struktuuri. Viimase iseloom oleneb väga suurel määral sellest, kas meil on tegemist juhi või pooljuhiga. Esimesel juhul külgneb ergastusnivoo tsoon vahetult põhitsooniga. Need tsoonid võivad isegi teineteist vastastikku katta. Temperatuuri absoluutse nulli piirkonnas on põhitsoon elektronidega täielikult täidetud, kuna temaga vahetult külgnev või teda kattev ergastusnivoo tsoon on vaba. Seetõttu on põhitsooni elektronidel võimalik madalamatelt nivoodelt kõrgematele siirduda. Säärane üleminek ei saa toimuda iseendast. Kui aga mõjutada keha välise elektriväljaga, siis viimase toimet hakkavad elektronid liikuma suunatult, muutes seejuures oma energiat ja üle minnes kõrgematele nivoodele. Selle tulemusel tekibki elektrijuhtivus.



Joon. 2. Juhi (a), pooljuhi (b) ja mittejuhi (c) elektronspektri energietiline struktuur.

Käsitleme nüüd pooljuhi energiatsoonide struktuuri (joon. 2). Absoluutsele nullile lähedasel temperatuuril on kõrgeim täidetud tsoon 1 täielikult valentselektronidega täidetud. Edasi järgneb keelatud tsoon, ja selle peal asub vaba tsoon 2. Selleks et elektrijuhtivus tekkida võiks, peab teatav hulk elektrone siirduma täielikult täidetud tsoonist vabasse tsooni, kus nad välise elektri-

välja toimetel liikuda saaksid. Kui see tingimus pole täidetud, ei saa elektrijuhtivust tekkida ka välise elektrivälja toimetel, sest täielikult täidetud energiatsoonis ei saa elektronid oma seisundit muuta. Parimal juhul võivad nad

vahetada oma «kohti». Kuid säärane kohavahetus ei mõjuta elektronide üldist seisundit millegagi. Selleks et pooljuhis tekiks elektrivool, peab osa põhitsooni elektronidest siirduma ülemisse ergastusnivoode tsooni. Selleks omakorda tuleb aga igale elektronile anda teatav energia  $\Delta E$ . Ilma välisenergia kuluta on elektronide siirdumine kõrgematele energianivoodele võimatu, järelikult on võimatu ka elektrivoolu tekkimine. Seega eraldab pooljuhti metallist keelatud energiatsooni olemasolu, mille «laiuseks» on  $\Delta E$ .  $\Delta E$  suurus kõigub mitmesuguste pooljuhtide puhul mõnest kümnendikust kuni 1,5 elektronvoldini.

Ülaltoodud seisukohtadelt saab selgeks ka vastus küsimusele, mis on mittejuhid. Need on sääraseid ained, millede keelatud tsooni laius  $\Delta E$  on suhteliselt suur, ulatudes 1,5-st mitme elektronvoldini. Loogilise järeldusena järgneb siit, et ainult  $\Delta E$  suuruse järgi ei saa tõmmata teravat piiri pooljuhtide ja mittejuhtide vahele. Kuid see tunnus on siiski mitmes suhtes väga iseloomustav ja etendab tähtsat osa pooljuhtide teoorias.

Ainult metallil on seega kõikides tingimustes alati hea elektrijuhtivus. Mittejuhtidel ja pooljuhtidel on eritakistus absoluutse nulli läheduses väga suur. Veel enam, isegi harilikul toatemperatuuril peaks nende ainete eritakistus olema väga kõrge. Mittejuhtide suhtes vastab see tõele: me tunneme aineid, millede eritakistus ulatub kuni  $10^{20} \Omega \text{ cm}$ . Mis puutub aga pooljuhtidesse, siis toatemperatuuril on neil erandita kõigil märkimisväärne erijuhtivus, mis asub piirides  $10^4$  kuni  $10^{-10} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ . Seega, kuigi võiks arvata, et pooljuhid peaksid keelatud tsooni  $\Delta E$  olemasolu tõttu elektrit väga halvasti juhtima, avaneb meile tegelikkuses sootuks teistsugune pilt. Selle nähtuse põhjust käsitletakse järgmises paragrahvis.

Jäab lisada veel mõni sõna kasutatud terminoloogia kohta. Pooljuhi valentselektronide põhilist energiatsooni, mis on täielikult täidetud absoluutse nulliga võrduval temperatuuril, nimetatakse **t ä i d e t u d t s o o n i k s**. Allpool näidatakse, et reaalses tingimustes võib see tsoon olla osaliselt vaba. Hoolimata sellest on see termin juurdunud ja kõikjal kasutatav. Tuleb ainult silmas pidada, et kui räägitakse täidetud tsoonist, siis viimane ei ole antud tingimustes sõna tõsisel mõttes elektronidega täidetud, vaid täitub nendega alles siis, kui temperatuur võrdub abso-

luutse nulliga. Täpselt samal viisil nimetatakse ergastusnivoode tsooni vabaks ehk juhtivustsooniks, kuigi see tsoon on vaba ainult temperatuuri absoluutse nulli juures.

## ELEKTRON- JA AUKJUHTIVUS

Energiatsoonide olemasolu võimaldab mõista pooljuhtide elektrijuhtivuse mehhanismi. Selleks et elektron saaks siirduda täidetud tsoonist juhtivustsooni, peab ta oma energiat suurendama suuruse  $\Delta E$  võrra. Enamiku pooljuhtide juures asub  $\Delta E$  arvväärts 0,1 ja 1,5 eV vahel. Missugusest allikast võib elektron selle energiahulga võtta? Sääraseid allikaid on palju. Põhiliseks ja ühtlasi ka peamiseks allikaks osutub pooljuhi aatomite termiline liikumine. Tavalisel toatemperatuuril ei ületa osakeste keskmine termiline energia 0,04 elektronvolti. Samal ajal on aga energiahulk, mis tuleb kulutada selleks, et pooljuhi seotud elektron muutuks juhtivuselektroniks, umbes 30 korda suurem. Näib, et termiline liikumine ei suuda elektrone täidetud tsoonist vabastada. Kuid tegelikult pole see nii. Asi seisab selles, et termiline liikumine kujutab endast kaootilist protsessi, millel on statistiline iseloom ja millest võtab osa kolossaalne hulk osakesi. Säärases protsessis, nagu igas teiseski, millest võtab osa väga suur hulk objekte, esineb alati fluktuatsioone, s. t. kõrvalekaldumisi keskväärtsustest. Nende fluktuatsioonide tõttu, mida esineb muide igal temperatuuril, leidub teatav hulk aatomeid, millede termiline energia ulatub ühe elektronvoldini ja veel kõrgemalegi. Säärased aatomid võivad naabruses olevate seotud elektronidega kokku põrgates neile üle anda oma energia, mis on täiesti piisav selleks, et elektroni juhtivustsooni viia.

Kui ei esineks üksikuid, ühe elektronvoldini ulatuvaid või seda ületavaid termilisi fluktuatsioone, siis enamus puhtaid pooljuhte oleksid kuni oma sulamistemperatuurini mittejuhtivad. Temperatuuri tõusmisel muutub termiline liikumine intensiivsemaks, fluktuatsioonid kasvavad ja koos sellega kasvab ka juhtivuselektronide arv. Vastupidi, temperatuuri langemisel vähenevad fluktuatsioonid ja koos sellega ka juhtivuselektronide arv, muutudes temperatuuri absoluutse nulli juures nulliks. Juhtivuselektronide arv sõltub järelikult temperatuurist.

Elektriline erijuhtivus  $\sigma$  omakorda sõltub samuti temperatuurist ja ta avaldub järgmiselt:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

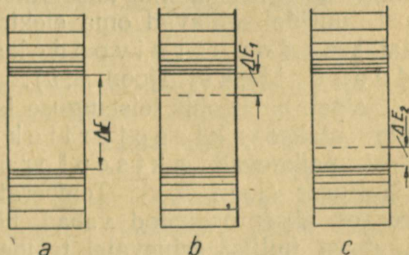
kus  $\Delta E$  — keelatud tsooni «laius»;

$k$  — Boltzmanni konstant;

$T$  — absoluutne temperatuur;

$\sigma_0$  — teatav konstantne suurus, mille arvvärtus paljude pooljuhtide puhul võrdub  $10^5$ -ga.

Seega on termilise liikumise olemasolu selleks otsustavaks teguriks, mis määrab pooljuhtide elektrijuhtivuse. Kuid terve rida eksperimentaalseid andmeid näitab, et selle teguri kõrval avaldab pooljuhi elektrijuhtivusele väga suurt mõju ka lisandite, s. t. teiste ainete aatomite olemasolu pooljuhis. Tühise hulga lisandite sisseviimine pooljuhti suurendab erakordselt tugevasti, mõnikord isegi kümneid miljoneid kordi, selle elektrilist erijuhtivust. Metallide juures võib tähele panna hoopis vastupidist: lisandite sisseviimine metalli vähendab tema elektrijuhtivust. Lisandite toime hoolikas analüüs näitas, et elektrijuhtivuse mehhanism on põhiliselt määratud just lisandi aatomite poolt. Veel enam, selgus, et täiesti puhtaid pooljuhte looduses praktiliselt üldse ei esine, vaid et me kohtame peamiselt just lisanditega pooljuhte. Lisandite toime füüsikalise olemuse selgitamiseks on joonisel 3 skemaatiliselt kujutatud pooljuhi energietiline struktuur.



Joon. 3. Lisandite energianivood.

*a* — lisanditeta pooljuht; *b* — doonorniivod; *c* — aktseptorniivod.

Täiesti puhtas pooljuhis siirduvad elektronid juhtivustsooni täidetud tsoonist. Seejuures peavad elektronid oma energiat suurendama suuruse  $\Delta E$  võrra. Viime nüüd pooljuhisse säärase lisandi, mis aine elektrijuhtivust mitu korda suurendab. Elektrijuhtivuse  $\sigma$  mitmekordne suurendamine võib tähendada juhtivuselektronide hulga samasugust kasvamist. Teiselt poolt on aga teada, et juhtivus-

tsoonis olevate elektronide arv võib suureneda esiteks temperatuuri tõusu ja teiseks — keelatud tsooni laiuse  $\Delta E$  vähenemise tõttu. Kuna vaadeldaval juhul temperatuur ei muutu, jääb üle oletada, et lisandite sisseviimine kergendab mingisugusel viisil elektronide siirdumist juhtivustsooni.

Kõrvutades suure hulga eksperimentaalseid andmeid, tulid füüsikud järeldusele, et käsitletud lisandite elektronide energeetilised nivood paiknevad juhtivustsooni ligidal, sattudes sel viisil keelatud tsooni sisse. Lisandi aatomid, mis on juhtivustsooni saadetavate elektronide allikaks, annavad neid elektrone ära hõlpsasti seetõttu, et nende energeetilised nivood osutuvad kõrgemateks täidetud tsooni elektronide vastavatest nivoodest. Järelikult selleks, et siirduda vabasse tsooni, peavad lisandi elektronid tõstma oma energiat suuruse  $\Delta E_1$  võrra, mis on  $\Delta E$ -st väiksem. Temperatuuri absoluutse nulli juures on säärased lisandite nivood täielikult täidetud, absoluutsest nullist kõrgematel temperatuuridel annavad nad aga oma elektrone vabasse tsooni seda intensiivsemalt, mida kõrgem on aine temperatuur.

Lisandite nivoosid, mis absoluutse nulli puhul on täielikult hõivatud ja mis absoluutsest nullist erinevatel temperatuuridel annavad oma elektrone vabasse tsooni, nimetatakse doonornivodeks, lisandeid endid aga doonoriteks (joon. 3, b).

Esineb ka hoopis teistsuguse iseloomuga lisandeid, mida nimetatakse aktseptoriteks. Erinevalt doonornivoodest paiknevad aktseptornivood täidetud tsooni läheduses (joon. 3, c). Temperatuuri absoluutse nulli juures on akseptornivood vabad, hõivamata, Järelikult absoluutsest nullist erinevatel temperatuuridel võivad elektronid täidetud tsoonist säärasele nivoole siirduda. On ilmne, et aatomite ja elektronide termilisel liikumisel esinevate fluktuatsioonide tõttu paisatakse elektronid täidetud tsoonist lisandi aktseptornivoole suurema tõenäolisusega, kui vabasse tsooni. Miks? — Seepärast, et  $\Delta E_2 < \Delta E$ . Mingisuguse temperatuuri  $T$  juures siirdub järelikult lisandi nivoole tunduvalt rohkem elektrone, kui neid samades tingimustes vabasse tsooni satub. Mida kõrgem on seejuures temperatuur  $T$ , seda rohkem elektrone siirdub täidetud tsoonist lisandi aktseptornivoole. Kuid teatava osa elektronide lahkumine täidetud tsoonist annab sinnajäänud elekt-

ronidele võimaluse elektrijuhtivusest samuti osa võtta. Tõepoolest, kui täidetud tsoonis tekib elektronide lahkumise tõttu vabu nivoosid, siis on loomulik, et välise elektrivälja toimel siirdub nendele nivooidele teisi, sama tsooni elektrone. Seega elektronide osaline lahkumine täidetud tsoonist annab sinnajäänud elektronidele reaalse võimaluse siirduda suhteliselt madalamatelt nivoodelt kõrgematele ja vastupidi. Kirjeldatud liikumine toimub ühe ja sama, varem elektronide poolt täielikult hõivatud täidetud tsooni piires. Mis on aga täidetud tsooni elektronide liikumise tulemuseks? — Kui teatav arv elektrone siirdus täidetud tsoonist vabasse tsooni või lisandite aktseptornivooidele, siis tekkis täidetud tsooni täpselt sama palju vabu kohti, s. t. hõivamata nivoosid. Hõivamata nivooe olemasolu annab täidetud tsooni jäänud elektronidele võimaluse selle tsooni piires ümber paikneda. Oletame, et täidetud tsooni teatavalt nivoolt  $A$  lahkus üks elektron. Selle tagajärjel tekkis hõivatud nivoo asemel hõivamata, vaba nivoo ehk — nagu seda mitte päris õnnestunud terminiga nimetatakse — «auk». See «auk» hõivatakse otsekohe mõne ligema naaberelektroni poolt, kuid selles kohas, kus vaadeldav naaberelektron asus, tekib seetõttu uus «auk». Viimane täitub omakorda mõne naaberelektroniga, tekib uus, seekord juba kolmas «auk» jne.

Olgu pooljuhile rakendatud potentsiaalivahe. Mis sünnib sel puhul? Elektrivälja toimel hakkavad täidetud tsooni elektronid liikuma vastu elektrivälja suunda. Elektronide säärase põhiliikumise puhul täidetakse augud kõige tõenäolisemalt nende elektronidega, mis aukudele elektrivälja toimel liginevad. Kuid need elektronid jätavad seejuures vabaks uusi auke, mis omakorda täidetakse vastu elektrivälja liikuvate elektronide poolt. Selle tulemusel liiguvad elektronid elektrivälja asetatud pooljuhis negatiivselt poolluselt positiivsele, samal ajal kui augud vastassuunas «ümber paiknevad». Kui elektronid potentsiaalivahe toimel näiteks vasakult paremale liiguvad, siis paiknevad augud ümber paremalt vasakule. Niisugune on elektronide ja aukude liikumise iseloom elektriväljas. Püüame nüüd veidi sügavamalt mõista, mida kujutab endast «auk». On ilmne, et kui mingilt kohalt kristallvõres lahkus elektron, mille tulemusel seal tekkis auk, siis see nähtus on samaväärne positiivse laengu tekkimisega antud kohas. Tõepoolest, iga elektroni kaotus varem neutraalse keha poolt on ekviva-

lente samasuure positiivse laengu ülejäägiga. Järelikult käitub iga auk nii, nagu oleks ta positiivne laeng.

Tegelikult liiguvad pooljuhis muidugi ainult elektronid. Kuid elektronide välisliikumine avaldub erinevalt, olenevalt sellest, missugused elektronid elektrivälja toimel suunatud liikumisest osa võtavad. Kui elektrivool on tekitatud ainult täidetud tsooni elektronide poolt (mis esineb aktseptorlisanditega pooljuhtides), siis vastab voolukandjate liikumine positiivsete laengute liikumisele. Kui potentsiaalivahe on rakendatud doonorlisanditega pooljuhile, siis osutuvad voolukandjateks ainult vabas tsoonis olevad elektronid.

Järelikult esineb kaks erinevat elektrijuhtivuse mehhanismi: elektron- ja aukjuhtivus. Esimene neist vastab elektronide liikumisele vabas tsoonis ja teine — elektronide või positiivsete aukude liikumisele täidetud tsoonis. Esimene juhtivusmehhanism on põhjustatud doonor- ja teine — aktseptorlisanditest.

Missugune juhtivusmehhanism esineb puhtas, lisanditeta pooljuhis, millel on ideaalne kristallvõre? Soojuslike fluktuatsioonide toimel paisatakse elektrone täidetud tsoonist vabasse, juhtivustsooni, kus nad käituvad umbes nii, nagu metallide vabad elektronid. Esimesel pilgul võib näida, nagu oleks meil siin tegemist tüüpilise elektronjuhtivuse mehhanismiga. Kuid see järeldus osutuks rutakaks. Üheaegselt elektronide siirdumisega täidetud tsoonist juhtivustsooni tekivad esimeses augud. Viimased võivad elektrivälja toimel ümber paikneda, tekitades seega nn. aukvoolu. On selge, et juhtivuselektronide hulk vastab nendes tingimustes täpselt aukude hulgale. Kui nüüd särasele puhtale pooljuhile rakendada väline elektriväli, siis hakkavad elektronid liikuma vastu välja, tekitades elektronvoolu; augud aga paiknevad ümber välja suunas, tekitades aukvoolu. Üldine, summaarne vool koosneb särases pooljuhis järelikult kahest komponendist: elektron- ja aukvoolust ning tema väärtuseks kujuneb

$$I = I_{el} + I_{auk}.$$

Kuid

$$I_{el} = n_{-} e u_{-} S E$$

ja

$$I_{auk} = n_{+} e u_{+} S E.$$

Järelikult

$$I = n_- e u_- SE + n_+ e u_+ SE.$$

Ülaltoodud valemities on kasutatud järgmisi tähiseid:

- $n_+$  ja  $n_-$  — vastavalt aukude ja elektronide kontsentratsioon;  
 $e$  — elektroni või augu laeng;  
 $u_+$  ja  $u_-$  — vastavalt aukude ja elektronide liikuvus, s. t. nende keskmine liikumiskiirus elektriväljas, mille tugevuseks on 1 V/cm;  
 $E$  — elektrivälja tugevus;  
 $S$  — pooljuhi ristlõikepindala.

Summaarse voolu  $I$  elektronkomponent ei võrdu aukkomponendiga, s. t.  $I_{e1} \neq I_{auk}$ . Hoolimata elektronide ja aukude täiesti võrdsest kontsentratsioonist on elektronvool  $I_{e1}$  alati suurem aukvoolust  $I_{auk}$ . Põhjuseks on siin asjaolu, et elektronide liikuvus osutub aukude liikuvusest veidi suuremaks.

Seetõttu ongi ideaalselt puhtal, lisanditeta pooljuhil nõrgalt väljendatud elektronjuhtivuse mehhanism.

Märgime möödamindes, et lisanditeta pooljuhtides esinevat juhtivust nimetatakse oma juhtivuseks ja neid pooljuhte — isepooljuhtideks. Lisanditest tingitud juhtivust nimetatakse aga lisandjuhtivuseks ja lisanditega pooljuhte — lisandpooljuhtideks.

Kõikides reaalsetes pooljuhtivates ainetes, mis teatavasti alati on lisandpooljuhid, on juhtivuse iseloomu faktiliseks määrajaks pooljuhi temperatuur. Madalatel temperatuuridel põhjustavad elektri juhtivust peamiselt lisandid. Temperatuuri tõustes suureneb niisuguste fluktuatsioonide arv, mis suudavad küllalt suurt hulka elektrone madalamast tsoonist vabasse tsooni paisata. Ja lõpuks, küllalt kõrgetel temperatuuridel pääseb täiel määral mõjule aine oma juhtivus.

Käsitledes lisandite toimet pooljuhtide juhtivuse mehhanismile, tuleb märkida, et lisandite ülesannet võivad täita mitte ainult kõrvaliste ainete aatomid. Samasugune efekt ilmneb ka siis, kui «lisanditeks» on mõnda pooljuhtivat ühendit moodustatavate elementide omad aatomid. Viimasel juhul on aga vajalik, et mõne elemendi aatomite arv pooljuhis ületaks hulga, mis vastab selle pooljuhi keemi-

lises valemis antud suhtele. Metallide aatomite ülekaal toob seejuures reeglina kaasa elektronjuhtivuse, kuna aga metalloidi aatomite ülekaaluga kaasub aukjuhtivus. Näiteks talliumsulfiidis (TlS) põhjustab talliumi ülehulk elektronjuhtivust, väevli ülehulk aga aukjuhtivust. Seatinasulfiidis (PbS) kaasneb seatina ülehulgale elektronjuhtivus, väevli ülehulgale aga aukjuhtivus jne. Kuigi toodud reeglit ei saa üldistada kõikide pooljuhtide kohta, on ta paljude ainete puhul siiski küllaldase täpsusega täidetud.

Lisandite toime elektri juhtivuse suurusele ja iseloomule ning elektron- ja aukjuhtivuse mehhanismide olemasolu on tähtsad tegurid, mis etendavad tähtsat osa pooljuhtide tehnilises rakendamises.

### DISSOTSIIATSIOONIENERGIA

Keelatud tsooni laius  $\Delta E$ , teise nimetusega dissotsiatsioonienenergia, kujutab endast tähtsat füüsikalist suurust, mis paljuski määrab ära pooljuhi elektrilised omadused. Samuti on pooljuhi põhiparameetriks lisandite aktivatsioonienenergia  $\Delta E_1$ . Nende suuruste tundmine on olulise tähtsusega.

Puhta, lisanditevaba pooljuhi elektriline erijuhtivus  $\sigma$  olenes, nagu juba märgitud, temperatuurist, s. t.

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

Kuid praktikas kohtab peamiselt lisanditega pooljuhte. Kuna lisandite aktivatsioonienenergia  $\Delta E_1$  on keelatud tsoonist  $\Delta E$  kitsam, siis teatavas temperatuurivahemikus esineb peamiselt lisandjuhtivus ja sellest kõrgematel temperatuuridel omajuhtivus. Lisanditega pooljuhi elektri juhtivuse sõltuvust temperatuurist tuleb järelikult väljendada üldisema valemiga

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} + \sigma_1 e^{-\frac{\Delta E_1}{2kT}},$$

kus esimene liige vastab omajuhtivusele ja teine lisandjuhtivusele.

Madalatel temperatuuridel võrdub selle valemi esimene

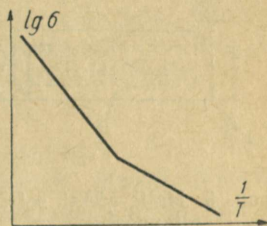
liige praktiliselt nulliga, sest aine juhtivus on sel puhul määratud põhiliselt lisandite poolt. Temperatuuri tõusmisel hakkab järjest suuremat osa mängima omajuhtivus. Teatava temperatuurivahemiku lõpul lisandites moodustunud tsentrid tühjenevad, s. t. nad ei suuda enam elektrone ära anda ja aine juhtimise määrab siis ainult tema omajuhtivus.

Teades seadust, mille järgi elektrijuhtivus sõltub temperatuurist, ei ole raske mõõta suurusi  $\Delta E$  ja  $\Delta E_1$ . Väljendades  $\Delta E_1$  elektronvoltides, saame:

$$\Delta E = 0,4 \operatorname{tg} \varphi.$$

Kui määrata lisanditega pooljuhi elektrijuhtivust mitmesugustel temperatuuridel, alates madalatest ja tõustes peaaegu kuni uuritava aine sulamistäpini, ning kujutada graafiliselt  $\log \sigma$  sõltuvust suurusest  $1/T$ , siis saadakse enamiku pooljuhtide puhul tulemuseks murtud sirgjoon. (joon. 4). Karakteristiku parempoolne osa kuni murdepunktini vastab lisandjuhtivusele. Vasakpoolne osa, alates murdepunktist, vastab aine omajuhtivusele.

Pooljuhi elektrilise erijuhtivuse temperatuurisõltuvuse uurimine, mis võimaldab arvutada suurusi  $\Delta E$  ja  $\Delta E_1$ , lubab järelikult otsustada antud pooljuhi elektriliste omaduste üle.



Joon. 4. Lisanditega pooljuhi elektrijuhtivuse sõltuvus temperatuurist.

## VOOLUKANDJATE LIKUVUS

Voolukandjate — elektronide või aukude — liikuvuse arväärtusest sõltuvad pooljuhi olulised omadused. Voolukandjate liikuvuse all mõistetakse suurust, mis arvuliselt võrdub elektroni või augu liikumiskiirusele elektriväljas, mille tugevuseks on 1 V/cm. Liikuvuse definitsioonist endast järgneb, et

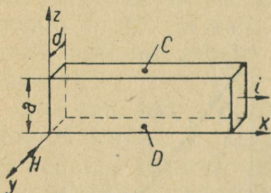
$$u = \frac{v}{E},$$

kus  $v$  — osakese kiirus elektriväljas tugevusega  $E$ .

Siit tuleneb ka liikuvuse dimensioon —  $\text{cm}^2/\text{Vsec}$ .

Liikuvust saab mõõta mitmete meetoditega. Üheks sääraseks meetodiks on Halli efekti uurimine, millele järgneb aine elektrijuhtivuse mõõtmine.

1879. aastal avastas ameerika füüsik Hall nähte, mis seisab järgmises. Kui läbi metallist või pooljuhist valmistatud homogeenise plaadikese juhtida voolu piki  $x$ -telge vasakult paremale, nagu näidatud joonisel 5, siis ekvipotentsiaalsed jooned kujutavad endast sirgeid, mis on paralleelsed plaadikese piki  $z$ -telge kulgeva servaga. Sümmeetriliselt paiknevate punktide  $C$  ja  $D$  vahel ei esine mingit potentsiaalivahet. Kui seejärel asetada plaadike magnetvälja nii, et viimane oleks suunatud piki  $y$ -telge, s. o. perpendikulaarselt voolujoontega, siis tekib



Joon. 5. Halli efekti selgitamiseks.

punktide  $C$  ja  $D$  vahele potentsiaalivahe, mille suurus on võrdeline nii vooluga  $I$  kui ka magnetvälja tugevusega  $H$ . Seda nähet, mida nimetatakse Halli efektiks, võib seletada järgmiselt.

Magnetväljas liikuvale elektrilaengule mõjub jõud

$$F = evH \sin \varphi,$$

kus  $e$  — laengu suurus;

$v$  — laengu kiirus;

$H$  — magnetvälja tugevus;

$\varphi$  — nurk  $v$  ja  $H$  sihtide vahel.

Kui  $\varphi = 90^\circ$  (s. t. kui magnetväli on liikuva laenguga risti), siis on jõud  $F$  maksimaalne ja võrdub  $evH$ -ga. Oma sihilt on ta risti ühteageu nii kiiruse kui ka magnetvälja sihiga.

Mehaanika elementaarkursusest on teada, et juhul, kui liikuvale kehale mõjub jõud, mis on risti kiiruse sihiga, siis muudab säärane jõud ainult kiiruse suunda, jättes mõjutamata selle suurust. Keha liigub seejuures ringjoonelisel trajektoorigil, mille kõverusraadiuseks olgu  $r$ . Ka käsitletaval juhul, kus elektrilaeng liigub püsivas magnetväljas, on tema trajektoorigiks ringjoon raadiusega  $r$ . Raadiust  $r$  võib leida, kui arvestada, et tsentrifugaaljõud  $\frac{mv^2}{r}$

võrdub laengule mõjuva jõuga  $evH$ , s. t.  $\frac{mv^2}{r} = evH$ . Siit saame  $r = \frac{mv}{eH}$ .

Magnetvälja asetatud pooljuhis või metallis kalduvad voolu moodustavad elektronid neile mõjuvate magnetiliste jõudude toimel üles- või allapoole, olenevalt väljatugevuse  $H$  ja laengu kiiruse  $v$  sihist. Kui elektronid liiguvad näiteks paremalt vasakule, siis kalduvad nad ülespoole ja laevad plaadikese ülemisele tahule negatiivselt. Selle tulemusel tekib ristisuunatud elektrivälja tugevusega  $E$  V/cm ja punktide  $C$  ning  $D$  vahel kujuneb potentsiaalivahe

$$V = Ea,$$

kus  $a$  — plaadi püstserva pikkus (joon. 5).

Ülespoole kalduvad elektronid laevad plaadi ülemist tahku niikaua, kuni tekib tasakaaluseisund, mille juures ristisuunatud vool kaob. Tasakaaluseisund tekib siis, kui elektrostaatiline jõud  $eE$  muutub võrdseks magnetilise jõuga  $evH$ , s. t. kui

$$eE = evH. \quad (a)$$

Pooljuhist valmistatud plaati läbiv vool

$$I = nevad,$$

kus  $n$  — voolukandjate kontsentratsioon.

Asendades tasakaalutingimuses (a) esineva laengu kiiruse  $v$  viimasest valemist saadava väärtusega, leiame, et

$$E = \frac{1}{ne} \cdot \frac{IH}{ad}.$$

Teiselt poolt nägime, et punktide  $C$  ja  $D$  vahel valitsev potentsiaalivahe  $V = Ea$ . Asendades nüüd  $E$  tema eespoolleitud väärtusega, saame potentsiaalivahe avaldise lõplikul kujul:

$$V = \frac{1}{ne} \cdot \frac{IH}{d}.$$

Sellest valemist nähtub, et pooljuhi kahe punkti vahel tekkiv potentsiaalivahe on võrdeline nii vooluga  $I$  kui ka magnetvälja tugevusega  $H$ . Murdu  $\frac{1}{ne}$ , mis ühel ja samal temperatuuril on iga pooljuhi puhul konstantne, nimetatakse Halli konstandiks. Täpsem teooria, mis arvestab voolu moodustavate elektronide erinevaid kiirusi, annab

Halli konstandi väärtuseks (viimast tähistatakse tavaliselt tähega  $R$ )

$$R = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{ne}.$$

Seega, uurides Halli efekti suuruse  $R = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{ne}$  mõõtmise teel, saab hõlpsasti määrata voolukandjate kontsentratsiooni  $n$ . Pooljuhi elektrijuhtivuse mehhanismi määrab seejuures punktide  $C$  ja  $D$  vahel tekkiva potentsiaalivahe märk. Aukjuhtivusega pooljuhtidel on Halli konstant positiivne, elektronjuhtivusega pooljuhtidel aga negatiivne.

Tuleb silmas pidada, et Halli efekti abil saab voolukandjate kontsentratsiooni määrata ainult säärastes pooljuhtides, millel esineb ainult üks juhtivuse mehhanism, olgu see siis kas auk- või elektronjuhtivus. Kui pooljuhil on sega- või omajuhtivus, siis on temast valmistatud plaadikest läbiv vool põhjustatud nii aukude liikumisest ühes kui ka elektronide liikumisest vastassuunas. Voolu ja magnetvälja etteantud suundade puhul langevad elektronide ja aukude hälbimissuunad kokku: nii esimesed kui ka teised kalduvad plaadis korruga kas ülemise või alumise tahu poole. Punktide  $C$  ja  $D$  vahel tekkiv potentsiaalivahe  $V$  määratakse sel puhul juba keerukama avaldisega, kus esinevad voolukandjate kontsentratsioonid ja nende liikuvused. Puhtfüüsikalistest kaalutlustest lähtudes pole raske mõista, et potentsiaalivahe  $V$  suurus ja märk oleneb sel puhul elektronide ja aukude kontsentratsioonide suhtest ja nende liikuvusest. Üksikutel erandjuhtudel võib  $V$  võrduda ka nulliga.

Segatüüpi pooljuhtidel avaldub Halli konstant järgmiselt:

$$R = \frac{3\pi}{8e} \cdot \frac{n_- u_-^2 - n_+ u_+^2}{(n_+ u_+ + n_- u_-)^2}.$$

Omajuhtivusega pooljuhtidel, millel

$$n_+ = n_- = n,$$

avaldub Halli konstant sääraselt:

$$R = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{ne} \cdot \frac{u_- - u_+}{u_- + u_+}.$$

Halli efekti abil saab ühtlasi kindlaks teha ka voolukandjate liikuvuse suurust. Selleks tuleb konstandi  $R$  mõõtmisele lisaks määrata veel antud pooljuhi elektrijuhtivus. Kui pooljuht omab ühte kindlat voolujuhtivuse mehhanismi — elektron- või aukjuhtivust, siis võimaldab elektrilise erijuhtivuse ja Halli konstandi korrutis arvutada liikuvust:

$$\sigma R = neu \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{ne} = \frac{3\pi}{8} u,$$

millest

$$u = \frac{8}{3\pi} \sigma R.$$

Tahke keha teoorias etendab voolukandjate liikuvus põhilist osa, sest see iseloomustab voolukandjate ja kristallvõre moodustavate aineosakeste vastastikust toimet. Ideaalses perioodilises väljas, mis peaks esinema ideaalselt puhastes kristallides temperatuuri absoluutse nulli juures, ei tohiks elektronid oma liikumisel kohata mingit takistust. Kuid tegelikkuses osutub säärane juht võimatuks ja reaalses tingimustes esineb teistsugune pilt. Termiline liikumine põhjustab elektronide tiheduse ja elektrivälja fluktuatsioone. Hulkalegeerunud lisandite võõraatomid või liigaatomid, samuti ka igasugused mehaanilised mittelegeerunud lisandid põhjustavad kristallvõres kohalikke moonutusi. Need aga takistavad elektronide liikumist ja avalduvad väliselt aine elektrilise takistuse olemasolus. Füüsikute keelde tõlgituna tähendab see seda, et antud konkreetsetes tingimustes ei ole voolukandjate liikuvus mitte piiramatult suur, vaid osutub lõplikuks suuruseks. Seetõttu pakub liikuvuse arväärtuse määramine suurt teoreetilist ja praktilist huvi. Asjaolu, et voolukandjate liikuvus reaalses pooljuhis osutub lõplikuks suuruseks, mille arväärtus oleneb kristallvõre tüübist, pooljuhi keemilisest koostisest ja kristallvõres esinevate ebakorrapärasuste hulga, seletub elektronide hajumisega kristallvõre ebakorrapärasustes. Elektrivälja toimel liikuma pandud elektronid taluvad oma teekonnal hulgalisi kokkupõrkeid, mille tagajärjel nende kiirused muutuvad nii suuruse kui ka sihi poolest, s. t. toimub see, mida nimetatakse «hajumiseks».

Voolukandjate liikuvuse suurus on erinevatel pooljuhtidel erinev ja ulatub mõnest kümnendikust kuni

80 000 cm<sup>2</sup>/Vsec, olles puhastes pooljuhtides suurem kui lisanditega pooljuhtides.

Teoreetiliste kaalutluste alusel võib eeldada, et liikuvuse suurus peab sõltuma kristallvõre tüübist. Eksperimentaalne kontroll kinnitabki seda. Ioonvõredegaga pooljuhtides on liikuvus väiksem kui aatomvõredegaga pooljuhtides. Liikuvuse erinevus on endastmõistetavalt tingitud elektronide ja kristallvõre vastastikuse toime iseärasustest. Kui elektronid põrkavad kokku neutraalsete aatomitega, siis ei ole elektronide hajumine kuigi suur. Palju enam ja intensiivsemalt hajuvad elektronid kohtumisel ioonvõret moodustavate võnkuvate ioonidega, sest elektronide vastastikune toime ioonidega on tunduvalt tugevam kui neutraalsete aatomitega.

Tabelis 1 on toodud voolukandjate liikuvuse arvvaartusi mõningate pooljuhtide kohta.

Tabel 1  
Pooljuhtide voolukandjate liikuvuse arvvaartusi

Aine	Voolukandja märk	Liikuvus temperatuuril $T = 3000^\circ \text{K}$ (cm <sup>2</sup> /Vsec)	Võre tüüp
Kuprioksüüd ehk vask-(II)oksüüd (CuO)	—	0,26	Ioonvõre
Kuprooksüüd ehk vask-(I)oksüüd (Cu <sub>2</sub> O)	+	100—150	"
Seatinasulfiid (PbS)	—	250	"
Seatinaseleniid (PbSe)	—	500—700	"
Germaanium (Ge)	—	3 900	Aatomvõre
Germaanium (Ge)	+	1 900	"
Räni (Si)	—	1 200	"
Räni (Si)	+	250	"

Ülalkäsitletud seisukohtadest lähtudes saab mõisteta- vaks voolukandjate liikuvuse sõltuvus temperatuurist. Pooljuhi temperatuuri kasvades tugevneb termiline liikumine ja koos sellega suureneb ka pooljuhi kristallvõres esinevate ebakorrapärasuste aste. Selle tulemusel suureneb elektronide ja kristallvõret moodustavate aineosakeste kokkupõrgete sagedus, mistõttu elektronide hajumine intensiivistub ja voolukandjate liikuvus väheneb. Vastupidi, temperatuuri langemisel voolukandjate liikuvus suureneb.

Teooria kohaselt peab liikuvus aatomvõredegaga pooljuhtides sõltuma pooljuhi temperatuurist järgmiselt:

$u = AT^{-3/2}$ . Valem on kehtiv kõrgetel temperatuuridel, kusjuures koefitsient  $A$  on iga antud pooljuhi puhul konstantne suurus.

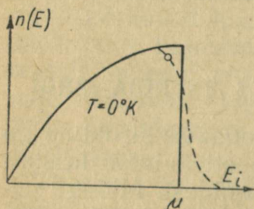
Liikuvuse suurusel on oluline tähtsus nii pooljuhtide teoorias kui ka nende praktilistel rakendusala del. Rea praktiliste küsimuste lahendamine oleneb ainult sellest, kas õnnestub saada pooljuhte, millede voolukandjate liikuvus oleks küllaldane.

## ELEKTRONIDE JAOTUS POOLJUHTIDES ENERGIA JÄRGI

Tutvudes tahke keha energeetilise tsonaalse struktuuriga võib lugejal tekkida mõnikord ebaõige ettekujutus kristallist kui kehast, mis koosneb energiatsoonidest. Midagi sellist pole tegelikult olemas. Energiatsoonide teooria peegeldab ainult elektronide energeetilist seisundit tahkes kehas. Tahke keha ise ei koosne mitte tsoonidest, vaid kristallvõret moodustavatest aineosakestest — aatomitest, ionidest või molekulidest. Kui me räägime täidetud või vaba tsooni elektronidest, siis tuleb seejuures alati silmas pidada, et kõne all ei ole mitte nende elektronide asend mingisuguses, ruumis geomeetrilisi mõõtmeid omavas tsoonis, vaid et käsitletakse elektronide energia suurust, mis peab olema teatavate, erinevate piirväärtuste vahel. Need piirväärtused ongi energiatsoonide ülemisteks ja alumisteks «piirideks». Energiatsoone kujutatakse tavaliselt diagrammide näol, kus püstteljele on kantud energia väärtused. Täidetud ja vaba tsooni elektronid on jaotatud tegelikult kogu kristallvõre ruumalas.

Temperatuuri absoluutse nulli juures kogunevad kõik vabad elektronid madalaimatele nivoo dele. Kuna ühel ja samal energianivool ei saa olla üle kahe elektroni, siis asetuvad elektronid mitmele nivoo le, energia väärtusega nullist kuni 5—10 elektronvoldini. Tuletame nüüd seaduse, mis temperatuuri absoluutse nulli juures määrab metalli valentselektronide jaotuse nende energia järgi. Teiste sõnadega, selgitame metalli igas kuupsentimeetris olevate elektronide arvu, millede energia on piirides  $E_1$  kuni  $E_1 + \Delta E = E_2$ , edasi piirides  $E_2$  kuni  $E_2 + \Delta E = E_3$  jne. Selle ülesande lahendamine võimaldab selgitada, kui palju on neid elektrone, millede energia on suletud energia vahemikku  $\Delta E$ , kusjuures viimane võib asuda energia null-

väärtusest mitmesugustel «kaugustel». Kui kujutada graafiliselt elektronide arvu sõltuvust energiast, saadakse kõver, mida nimetatakse Fermi-Dirac'i jaotuskõveraks. Kanname abstsissiteljele võrdsed energiavahemikud  $\Delta E$  ja ordinaatteljele elektronide arvu  $n$ , millede energia kuulub vahemikku  $E_1$  kuni  $E_1 + \Delta E$ , kusjuures  $E_1$  saab kordamööda väärtuse  $E_1, E_2, E_3$  jne. Tekkinud kõvera kuju on toodud



Joon. 6. Metalli vabade elektronide jaotus energia järgi.

joonisel 6. Märghime veelkord, et see kõver kujutab elektronide arvu  $n$  sõltuvust energiast  $E$  temperatuuri absoluutse nulli juures.

Joonisel 6 on abstsissiteljel paiknev äärmine punkt märgitud tähega  $\mu$ . Viimane tähistab maksimaalset energiat, mida metalli vaba elektron võib omada temperatuuri absoluutse nulli juures. Märghime, et  $\mu$  arv väärtus ulatub 5 kuni 10 elektronvoldini.

Molekulaarfüüsika seadustest järgneb, et aineosakeste (sealhulgas ka elektronide) keskmiseks soojusenergiaks on  $\frac{3}{2}kT$ , kus  $k$  tähistab Boltzmani konstanti ja  $T$  — absoluutset temperatuuri. Näiteks temperatuuril  $T = 1600^\circ \text{K}$  on selle energia väärtuseks 0,2 eV. Seega võrdub metalli aatomite keskmine soojusenergia isegi säärase kõrge temperatuuri puhul, nagu seda on  $1600^\circ \text{K}$ , ainult 0,2 elektronvoldiga. Samal ajal on temperatuuril  $T = 0^\circ \text{K}$  vaba elektroni maksimaalne energia metallis umbes 10 eV. Järelikult isegi nii kõrgel temperatuuril kui  $1600^\circ \text{K}$  muutub termilise liikumise tagajärjel elektronide jaotus energia järgi väga vähe. Põhjuseks on elektronide energia väga väikene muutumine energia maksimaalse väärtuse läheduses (joon. 6). Viimast nimetatakse «Fermi piiriks» või «Fermi nivooks».

Fermi jaotuskõvera analüüsist selgub, et metalli vabade elektronide enamiku energia on oma suuruselt lähedane  $\mu$ -le. Temperatuuril  $0^\circ \text{K}$  puuduvad elektronid, millede energia ületaks  $\mu$ . Absoluutsest nullist erinevatel temperatuuridel esineb küll elektrone, millede energia ületab  $\mu$ , kuid säärase elektronide kontsentratsioon väheneb nende energia kasvades.

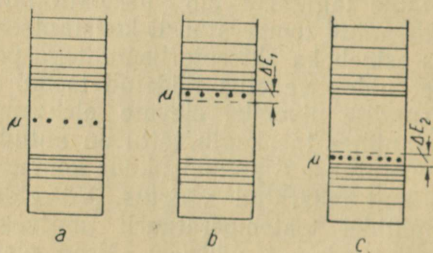
Termilise liikumise toimel lähevad pooljuhtides täidetud tsoonis või doonorlisandi nivool olevad elektronid üle

vabasse tsooni, kus nad täidavad nivoosid, alates kõige madalamast. On endastmõistetav, et elektronid, lahkudes madalamast tsoonist või lisandi nivooilt, jätavad sinna tühje kohti. Juhtivustsoonis viibib iga elektron teatava keskmise aja  $\tau$  vältel, pöördudes seejärel tagasi mõnele vabale nivoole. Järelikult toimub igas pooljuhis omapärane katkestamatu elektronide vahetusprotsess täidetud tsooni (või lisandite tsooni) ja vaba tsooni vahel. Selle protsessi tulemusel tekib dünaamiline tasakaal ülemise ja alumise tsooni vahel, mille tagajärjel juhtivuselektronide kontsentratsioon  $n$  jääb antud temperatuuril konstantseks. Analoo-giline protsess esineb ka aktseptorlisanditega pooljuhtides. Siin leiab aset pidev vahetus täidetud tsooni elektronide ja aktseptorlisandite nivoodel olevate elektronide vahel. Tekkinud dünaamilise tasakaalu tõttu on antud pooljuhis iga teatud temperatuuri  $T$  puhul aukude kontsentratsioonil  $n$  teatav, täielikult määratud väärtus. Võrreldes metallidega on pooljuhtidel toatemperatuuril juhtivuselektronide kontsentratsioon tunduvalt väiksem. Need elektronid on samuti energia järgi jaotatud. Arvutused näitavad, et teatavasse kindlaksmääratud vahemikku kuuluva energiaga vaba tsooni elektronide arvu sõltuvus energiast väljendub

matemaatilise avaldisega, milles esineb tegur  $e^{-\frac{E-\mu}{kT}}$ .  $E$  tähistab siin juhtivustsooni elektronide energiat; oma tähenduse tõttu võib  $E$ -l olla rida erinevaid väärtusi. Tähega  $\mu$  on tähistatud suurust, mida nimetatakse keemiliseks potentsiaaliks. Nagu ülaltoodud avaldisest selgub, suureneb  $E$  kasvades  $e$  astmenäitaja absoluutväärtus, kogu kordaja ise aga väheneb. Järelikult  $E$  kasvamisega vähe-neb elektronide tihedus juhtimistsoonis eksponentsiaalselt.

Keemilise potentsiaali nivoo asend energiadiagrammis sõltub pooljuhi tüübist, selles esinevatest lisanditest ja temperatuurist. Lisanditevabas pooljuhis asub keemilise potentsiaali nivoo  $\mu$  keelatud tsooni keskel (joon. 7, a). Elektronjuhtivusega lisandpooljuhis (elektronpooljuhis) asub keemilise potentsiaali nivoo lõigu  $\Delta E_1$  keskel ( $\Delta E_1$  tähistab lisandinivooilt aktiveerimise energiat) (joon. 7, b). Aukjuhtivusega lisandpooljuhis (aukpooljuhis), milles lisandite nivood paiknevad täidetud tsooni ülemisest piirist kõrgusel  $\Delta E_2$ , asub keemilise potentsiaali nivoo lõigu  $\Delta E_2$  keskel (joon. 7, c).

Keemilise potentsiaali nivoo asend sõltub samuti ka temperatuurist. Vaatleme näiteks elektronjuhtivusega lisandpooljuhti. Madalatel temperatuuridel, kus omajuhtivust praktiliselt ei esine, paikneb säärasel pooljuhil keemilise potentsiaali nivoo täpselt juhtivustsooni alumise piiri ja doonorlisandite nivoode vahemaa keskel. Temperatuuri kasvades siirdub üha enam elektrone täidetud tsoonist juhtivustsooni: lisandjuhtivusele liitub nüüd veel omajuhtivus. Selle tulemuseks on nivoo  $\mu$  nihkumine täidetud



Joon. 7. Keemilise potentsiaali nivoo asend.

*a* — lisanditeta pooljuh; *b* — elektronlisanditega pooljuh; *c* — auklisanditega pooljuh.

tsooni suunas. Kõrgetel temperatuuridel, kus lisandid on täielikult ioniseeritud, ei saa viimased enam olla elektronide allikaiks ja tekib omajuhtivus. Keemilise potentsiaali nivoo langeb seejuures keelatud tsooni keskele.

Reaalsetes tingimustes võib olla veel teisi juhte. Näiteks võib esineda pooljuhte doonor- ja aktseptorlisanditega, kusjuures doonorlisandite kontsentratsioon  $n_1$  ei võrdu aktseptorlisandite kontsentratsiooniga  $n_2$ . Doonor- ning aktseptornivoode aktiveerimisenergiad pole seejuures omavahel võrdsed. Kuid ka säärastel juhtudel on keemilise potentsiaali nivoo asendid täielikult määratud.

Alamal näidatakse, et keemiline potentsiaal kujutab endast põhilist füüsikalist mõistet, mis iseloomustab pooljuhi olulisi omadusi.

## VÄLJUMISTÖÖ

1884. aastal avastati, et kõrge temperatuurini kuumutatud tahke keha pinnalt paiskub keha ümber olevasse ruumi elektrone. Hilisemad uurimused näitasid, et nimetatud

rotsessi intensiivsus kasvab temperatuuri tõustes. Kirjel-  
datud nähet, mida nimetatakse termoelektronseks emis-  
siooniks, kasutatakse laialdaselt elektrovaakuumtehni-  
kas.

Esimesel pilgul võib näida, et metalli vabad elektronid  
võivad kergesti metallist lahkuda ja ruumi paiskuda. Kuid  
tavalistel temperatuuridel — näiteks toatemperatuuril —  
termoelektronset emissiooni praktiliselt ei täheldata. Sel-  
leks et välja lennata metalli pinnalt, peab elektron soori-  
tama teatava tööd. Kui elektron asub metalli sees, siis allub  
ta kõikide teda ümbritsevate elektronide ja positiivselt  
laetud tuumade koostoimele. Seetõttu kõikide elektronile  
mõjuvate jõudude resultant võrdub praktiliselt nulliga.  
Sel juhul aga, kui elektron läheneb metalli pinnale ja len-  
dab välja, tekib elektroni väljalennu kohas positiivse laen-  
gu ülekaal, mis püüab elektroni tagasi tõmmata. Selle  
tagasitõmbejõu ületamiseks kulutab elektron oma kineeti-  
list energiat, s. t. teeb tööd, mida on hakatud nimetama  
väljumistööks.

Varem juba märgiti, et temperatuuri absoluutse nulli  
juures jaotuvad elektronid energia järgi piirides nullist  
kuni 5—10 elektronvoldini. Maksimaalne energia vastab  
Fermi piirile. Kuna suure osa elektronide energia asub  
Fermi nivoo läheduses, siis on ka loomulik, et metallist  
lahkuvate elektronide enamikul ületab energia Fermi piiri  
teatava suuruse  $\varphi$  võrra, mis ongi väljumistöö.

Kuna elektroni keskmine kineetiline energia võrdub  
 $\frac{3}{2} kT$ -ga, siis on selge, et mida kõrgem on temperatuur,  
seda suurem on kineetiline energia. Kuid mitte kõikidel  
elektronidel ei ole kineetiline energia ühesuurune ja metal-  
lis leidub alati sääraseid elektrone, millede energia üle-  
tab kineetilise energia keskväärtuse. Seetõttu leidub metalli  
pinna läheduses mistahes temperatuuril elektrone, millede  
kiirus on suunatud väljaspoole ja millede kineetiline enea-  
ria on küllaldane väljumistöö sooritamiseks.

Temperatuuri kasvades suureneb säärase elektronide  
arv. Seetõttu suureneb temperatuuri kasvades ka termo-  
elektronse emissiooni intensiivsus.

Elektronide väljapaiskumine metallist võib toimuda ka  
teiste välistegurite mõjul, näiteks metalli pinna pommita-  
misel elektronidega (sekundaarne emissioon), valguskiir-  
tega kiiritamisel (välisfotoefekt), tugeva elektrivälja  
mõjul (külmmissioon) jne.

Tabelis 2 on toodud väljumistöö arvvaartusi puhaste metallide ja mõningate keemiliste elementide kohta.

Mõningate elementide väljumistöö suurus

Tabel 2

Element	Väljumistöö eV	Element	Väljumistöö eV
Alumiinium	4,28	Molübdeen	4,27
Baarium	2,29	Nikkel	4,84
Boor	4,5	Plaatina	5,29
Vismut	4,28	Rubiidium	2,13
Volfram	4,5	Seatina	4,02
Germaanium	4,56	Hõbe	4,28
Kaltsium	2,76	Seleen	4,72
Siliitsium	4,1	Strontsium	2,35
Magneesium	3,46	Antimon	4,08
Vask	4,47	Tseesium	1,89

Mis puutub elektronide väljumisse pooljuhist, siis on see protsess, nagu metallide juureski, seotud teatava energiakuluga. Sel puhul aga lahkuvad elektronid mitte keemilise potentsiaali nivoolt, vaid teistelt energianivoodelt. Pooljuhis ei ole keemilise potentsiaali nivool  $\mu$  mingeid elektrone. Keemilise potentsiaali nivoo paikneb siin keelatud tsoonis ja kõik elektronid asetsevad kas täidetud tsoonis, vabas tsoonis või lõpuks lisandinivool. On selge, et põhiline osa elektronidest asub täidetud tsoonis, kusjuures selle tsooni energianivoode tihedus kasvab suunas ülemiselt piirilt alumisele. Järelikult, kui liikuda täidetud tsooni ülemiselt piirilt alumisele, siis elektronide arv teatavas energiavahemikus kasvab. Ühes sellega suureneb ka elektronide pooljuhist väljapaiskumise võimalus mõne välise mõjutuse toimet. Niisuguseks väliseks mõjutuseks võib olla näiteks elektroni kokkupõrge mõne teise kiire elektroniga, mis annab vaadeldavale elektronile tugeva tõuke pooljuhi pinna suunas ja paiskab ta pooljuhi piiridest välja. Sel juhul on tähtis, et vaadeldavale elektronile antud kineetiline energia oleks suurem kui töö, mida elektron väljapaiskumisel kulutab takistusjõudude ületamiseks. Säärastes tingimustes tekib pooljuhtides elektronide emiteerimine eri energianivooga elektronide arvel, olenevalt pooljuhi tüübist (puhas või lisanditega pooljuht). Teiste sõnadega, väljumistöö oleneb pooljuhis nii lisan-

dite iseloomust (aktseptor- või doonorlisandid), kui ka nende hulgast. Pooljuhi elektronide emissiooni põhjustab seega mingi välismõjutus, nagu näiteks soojus, valguskiirgus, pommitamine aineosakestega, tugev väli jne. Väljapaisatud elektronid pärinevad seejuures kas täidetud tsoonist, juhtivustsoonist või lisandinivoodelt. Kõigist neist asjaoludest sõltub väljumistöö, mis on iga pooljuhi puhul erinev. Aukpooljuhtide puhul näiteks on väljumistöö valdaval enamikul juhtudest suurem kui elektronpooljuhtidel.

Väljumistöö suurusel on oluline tähtsus kõikides seadmetes ja aparaatides, millede töötamis põhimõte rajaneb elektronide emissiooni rakendamisel: fotoelementides, sekundaarelektron-kordistajates, elektronlampides jne. Nimetatud seadmetes tuleb vähendada nii palju kui võimalik väljumistöö suurus, sest see tagab intensiivsema elektronide emissiooni.

### ALALDAMINE

Real juhtudel võib metall kokkupuutes pooljuhiga või pooljuht kokkupuutes mõne teise pooljuhiga olla ühesuunalise (unipolaarse) juhtivusega. Säärased omadused on näiteks kuprooksüüdi ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) kihiga kaetud vaskplaadil. Kui kuumutada vaskplaati mõne minuti jooksul õhu käes temperatuuril  $1020^\circ\text{C}$ , siis kattub tema välispind  $\text{Cu}_2\text{O}$  kihiga. See tekib põhjusel, et vask, nagu enamik teisi metalle, oksüdeerub. Vastava tehnoloogilise protsessi tõttu kattub ahjus vaskplaadi oksüdeerimisel kuprooksüüdi kihiga ainult plaadi üks külg.

Unipolaarse juhtivuse uurimisel õnnestus selgitada, et see nähe on põhjustatud kontakteerivas (kokkupuutuvas) süsteemis esinevast õhukesest, nn. tõkkekihist, millel on suur oomiline takistus. Nimetatud kihi paksus on  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  cm. Tõkkekiht võib tekkida nii metalli ja pooljuhi kui ka kahe pooljuhi vahel. Ülalvaadeldud juhul formeerub tõkkekiht tekkivas kuprooksüüdi kihis, vase pinna läheduses, sel ajal, kui plaati kuumutatakse ahjus.

Kui ühendada niisugune vaskplaat elektromotoorse jõu allikaga vooluringi, siis osutab tõkkekiht väga suurt takistust elektronide liikumisele kuprooksüüdit vasessa ja laseb neid vabalt läbi vastassuunas. Vastavalt sellele nimetatakse voolu üht suunda tõkkesuunaks ja teist — avasuunaks.

Tökkekihte on kolme liiki: füüsikalisi, keemilisi ja segatüüpi. Tökkekihti nimetatakse keemiliseks siis, kui ta erineb pooljuhi põhimassist oma keemiliselt koostiselt. See erinevus võib muide olla mitte väga terav. Näiteks kuprooksüüdalaldajas on tõkkekihil keemiline loomus. Ta kujutab endast puhast kuprooksüüdi, sel ajal kui kuprooksüüdi põhilises osas esineb hapniku ülehulk. Seleenalaldajas on tõkkekiht samuti keemilise päritoluga ja moodustub seleeni reageerimisel pealmise metallektroodiga.

Keemiliseks loetakse ka tõkkekihti, mis on saadud mõne täiesti võõra aine — näiteks šellaki või kvartsi — õhukeses kihis pealekandmise teel. Tökkekiht moodustatakse pooljuhi ja metalli vahele. Sääraseid tõkkekihte kasutas alaldamistehnikas esimesena nõukogude füüsik V. P. Žuze.

Füüsikalisel tõkkekihil on keemiline koostis samasugune, mis pooljuhilgi, kuid ta erineb viimasest teataval määral oma elektriliste omaduste poolest. Praktikas kohtab kõige sagedamini segatüüpi tõkkekihte, millede omadused kujutavad endast füüsikaliste ja keemiliste tõkkekihtide omaduste teatavat kombinatsiooni.

Omal ajal esitati palju teooriaid, mis püüdsid kontakteeruvate kehade unipolaarset juhtivust seletada.

Näib, et kõige tõenäolisemaks tuleb lugeda alaldamise teooriat, mille järgi hea alaldamine esineb siis, kui puutuvad kokku kaks pooljuhti, milledest ühel on aukjuhtivus, ja teisel — elektronjuhtivus. Kõikide alaldajate konstruktsioon on nii läbi viidud, et metallalus oleks kontaktis ainult ühe pooljuhiga: kuprooksüüdiga, seleeniga, vasksulfiidiga, germaaniumiga või räniga. Igas alaldajas on alati veel olemas kontakt kahe, erineva juhtivusmehhanismiga pooljuhi vahel. Kuigi alaldaja valmistamisel kantakse metallile ainult üks teatav pooljuht, on valmistamistehnoloogia säärane, et metalli ja põhilise pooljuhi vahele tekib suhteliselt õhukene vahekiht aineist, mis mõnikord pooljuhist keemiliselt ei erine, kuid on erineva juhtivusmehhanismiga.

Vaatleme protsesse, mis leiavad aset aukpooljuhi ja elektronpooljuhi poolt moodustatud kontaktis, eeldades seejuures, et elektronide väljumistöö on aukpooljuhi puhul suurem kui elektronpooljuhi puhul. Niisugustes tingimustes tekkiv kontaktelektriväli tõrjub elektronpooljuhi juhtivuselektrone kontakti moodustavate pooljuhtide lahutuspinnalt teatavale kaugusele. Sama elektriväli, mõjutades aukpool-

juhis auke, sunnib neid liikuma lahtuspinnalt aukpooljuhi sügavusse. Selle tulemusel tekib vaadeldavas süsteemis kiht paksusega  $d$ , mis on voolukandjate poolest vaene. Kahte pooljuhti eraldav lahtuspind satub just sellesse kihti. Tähendab, voolukandjate poolest vaene kiht ulatub ühelt poolt aukpooljuhisse ja teiselt poolt elektronpooljuhisse. Säärase kihi elektriline eritakistus on tunduvalt suurem kummagi naaberpooljuhi elektrilisest eritakistusest. Hoolimata säärase kihi tühisest paksusest ( $10^{-5}$  cm piirides), on tema takistus mitu korda suurem alaldavat süsteemi moodustavate pooljuhtide takistuste summast. Seetõttu täidabki ta tõkkekihi ülesannet. Jälgime nüüd, kuidas käitub tõkkekiht vahelduvas välis-elektiväljas, s. t. olukorras, kus süsteemile on rakendatud muutuv potentsiaalivahe. Juhul kui välis-elektiväli on suunatud elektronpooljuhilt aukpooljuhile, tugevdab ta varemõjunud kontaktvälja, nii et elektronid ja augud veel enam lahtuspinnast eemalduvad. Selle tulemuseks on tõkkekihi paksenemine, mistõttu kasvab ka selle elektriline takistus.

Kui rakendatud potentsiaalivahe märk muutub vastupidiseks, siis on välis-elektiväli suunatud aukpooljuhilt elektronpooljuhi poole ja ta vähendab kontaktvälja. Seetõttu väheneb tõkkekihi paksus ja tema elektriline takistus langeb järsult.

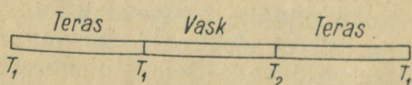
Vahelduvas välis-elektiväljas muutub seega alaldava süsteemi tõkkekihi paksus pulsseerivalt, luues tingimused unipolaarseks juhtivuseks. Tõkkekihi elektrilise takistuse vähenemine, mis leiab aset siis, kui välis-elektiväli on suunatud aukpooljuhi poolt elektronpooljuhi poole, sundides elektrone ja auke liikuma pooljuhtide lahtuspinnale ja neid seega teineteisele lähendades, vastab voolu juhtivale suunale. Voolu tõkestav suund vastab olukorrale, kus välis-elektiväli sunnib elektrone ja auke teineteisest eemalduma.

Lülitades alaldava süsteemi vahelduvvooluringi, on võimalik vahelduvvoolu alaldada. Seejuures kulgeb vool ühe poolperioodi vältel läbi alaldaja. Teise poolperioodi jooksul on alaldajat läbiv vool aga nii nõrk, et teda võib praktiliselt lugeda nulliks ja mitte arvesse võtta. Ava-suunas kulgeva voolu  $I_{ava}$  ja tõkkesuunas kulgeva voolu  $I_{tõkke}$  suhe iseloomustab ühe ja sama potentsiaalivahe puhul süsteemi alaldamisvõimet. Seda suhet nimetatakse

alaldusteguriks. Mida suurem on alaldusteguri arvvaartus ja mida suurem on mingi antud pinge puhul voolutihedus avasuunas, seda paremini täidab alaldaja oma ülesannet. Muidugi ei määra need kaks suurust üksi alaldaja kvaliteeti täielikult, kuid nad on tema väga tähtsateks parameetriteks.

### POOLJUHTIDE TERMOELEKTER

1821. aastal avastas Seebeck nähtuse, mida hakati nimetama «termoelektriliseks efektiks». Nimetatud efekt avaldub selles, et koostiselt erinevatest juhtidest moodustatud suletud vooluringis tekib elektrivool juhul, kui juhtidevahelised ühenduskohad asuvad erinevatel temperatuuridel.



Joon. 8. Termoelektriline ahel.

Vaatleme järgmist konkreetset näidet. Moodustame vooluahela kahest teras- ja ühest vasktraadi tükist. Kui joota nende traatide otsad kokku nii, nagu näidatud joonisel 8, siis saadakse avatud ahel, mille keskmine osa on moodustatud vasktraadist. Olgu  $T_1$  terastraatide otste ja esimese jootekohta ühiseks temperatuuriks. Kui nüüd teist jootekohta kuumutada temperatuurini  $T_2$ , siis tekib terastraadi otstel potentsiaalivahe  $V$ , mille suurus on proportsionaalne temperatuurivahega  $T_2 - T_1$ , s. t.  $V = \alpha(T_2 - T_1)$ .

Kui kolme traadi asemel kokku joota ainult kaks traati (üks terasest ja teine vasest), ja kui nagu eelneval juhulgi, kuumutada jootekohta temperatuurini  $T_2$  (traatide vabu otsi temperatuuril  $T_1$  hoides), tekib traatide vabadel otstel samuti potentsiaalivahe. Ühendades säärase ahela milliampermeetriga, näitab viimane voolu, mis püsib nii kaua, kuni püsib jootekohtade temperatuurivahe.

Kirjeldatud nähte puhul muutub soojusenergia vahetult elektrienergiaks. Hoolimata sellest äärmiselt tähtsast asjaolust peeti termoelektrit aastate vältel rohkem huvitavaks loodusnähtuseks kui tähtsaks teguriks, mida võib rakendada suurte energeetikaprobleemide lahendamisel.

«Oerstedi, Ampère'i ja Faraday suurte avastuste taustal,» kirjutab akadeemik A. V. Joffe, «äratas termoelekter vähe tähelepanu. Tema hilisem kasutamine temperatuuri mõõtmiseks oli tähtsusetu, võrreldes elektromagnetite, elektrimasinate ja transformaatoritega. Nii jäigi ta füüsika tagaõue.»

Olukord muutus järsult alles pärast seda, kui füüsikud, alates käesoleva sajandi kolmekümnendatest aastatest, hakkasid intensiivselt uurima neid termoelektrilisi nähteid, mis esinevad pooljuhtides.

Enne aga kui siirduda pooljuhtide juurde, selgitame, kuidas tekib potentsiaalivahe kolmest metalltraadist moodustatud ahela jootekohtade temperatuurivahest. Vaatleme algul lihtsamat juhtu. Kui homogeenest materjalist valmistatud traadi otsad asuvad erinevatel temperatuuridel  $T_1$  ja  $T_2$ , siis liigub elektrone traadi kuumemast otsast külmemasse otsa suuremal hulgal kui vastassuunas. Selle tulemusel omandab traadi kuumem ots positiivse ja külmem — negatiivse laengu. Positiivse ja negatiivse laengu tekkimine traadi otstel loob elektrivälja suunaga traadi kuumalt otsalt külmale otsale. Kuna traadi kuumast otsast difundeerub elektrone külmemasse otsa suuremal arvul kui vastassuunas, siis suureneb nii positiivne kui ka negatiivne ruumilaeng ja kasvab ka elektrivälja tugevus. Hoolimata püsivast temperatuurivahest lakkab lõpuks traadi otsas paiknevate laengute suurenemine. Põhjuseks on asjaolu, et elektrivälja tugevus on kasvanud määrani, mis kompenseerib difusioonijõud. Lõpptulemuseks jääb antud temperatuurivahe  $T_2 - T_1$  puhul traadi otstele kehtima püsiv potentsiaalivahe.

Kahe erineva metalli puhul on olukord veidi keerukam.

Ülal märgiti, et tekkiv potentsiaalivahe, ehk nagu öeldakse — termoelektromotoorne jõud, on proportsionaalne temperatuurivahega. Siit järgneb, et termoelektromotoorse jõu tegur  $\alpha$  võrdub arvuliselt potentsiaalivahega, mis tekib ühekraadilise temperatuurivahe puhul. Üldjuhul sõltub termoelektromotoorse jõu tegur  $\alpha$  ise samuti temperatuurist, kuid mõningate metallipaaride puhul ei ole see sõltuvus kuigi oluline. Teguri  $\alpha$  arväärtus on enamiku metallide puhul üldiselt väike. Tabelis 3 on toodud  $\alpha$  väärtusi mõningate metallide ja metallisulamite kohta, eeldusel, et paari teiseks metalliks on plaatina.

Termoelektromotoorse jõu teguri arvvaartused mõningatel metallidel ja metallisulamitel

Metalli (või sulami) nimetus	Sümbol (või koostis)	$\alpha$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )
Alumiinium	Al	+4
Alumeel	95%Ni+5% (Al, Si, Mg)	-10; -14
Vismut	Bi	-58; -73
Volfram	W	+7,9
Raud (puhas)	Fe	+18
Kuld	Au	+8
Iriidium	Ir	+6,5
Konstantaan	60% Cu + 40% Ni	-35
Kopeel	56% Cu + 44% Ni	-40
Kadmium	Cd	+9
Koobalt	Co	-17
Molibdeen	Mo	+13
Vask	Cu	+7,6
Manganiin	84%Cu + 13%Mn + 2%Ni + 1%Fe	+8
Magneesium	Mg	+4,1
Nikroom	80% Ni + 20% Cr	+15; +25
Nikkel	Ni	-15,2
Tina	Sn	+4,3
Plaatina-roodium	90% Pt + 10% Rh	+6,4
Plaatina-iriidium	90% Pt + 10% Ir	+13
Pallaadium	Pd	-5,7
Roodium	Rh	+6,4
Elavhõbe	Hg	+0,4
Antimon	Sb	+48
Seatina	Pb	+4,4
Hõbe	Ag	+7,2
Täntaal	Ta	+5
Kromeel	90% Ni + 10% Cr	+29,2
Tsink	Zn	+7

Teguri  $\alpha$  väike väärtus kõikide metallide puhul oligi üks neid põhjusi, miks termoelekter 130 aasta jooksul pärast tema avastamist ei leidnud energeetilist rakendamist. Suurt ja teenitud tunnustust leidis termoelektriline efekt ainult termomeetrias. Metallidest moodustatud termpaaride kasutegur võrdub tavaliselt mõne sajandiku, parimal juhul aga mõne kümnendiku protsendiga. See selektub jootekoha kuumutamiseks rakendatava soojusenergia tunduva osa kaoga ja teguri  $\alpha$  väikese väärtusega. Vabade elektronide kontsentratsioon jääb metallides ka suure temperatuurivahemiku puhul praktiliselt konstantseks ja nende kineetiline energia muutub temperatuuri mõjul vähe. Tem-

peratuurivahe metalljuhi otstel loob küll tingimused elektronide difusiooniks, kuid ülaltoodud põhjustel on tekkiv potentsiaalivahe väga väike.

Hoopis teistsugust pilti võib täheldada pooljuhtide juures. Termoelektriline efekt pooljuhtides erineb metallides esinevast efektist nii soodsalt, et on saanud võimalikuks kõnelda termoelektripatareide loomisest, mis soojusenergiat vahetult elektrienergiaks muundavad ja seda suhteliselt suure kasuteguriga. Pooljuhtides on voolukandjate kontsentratsioon toatemperatuuril teatavasti tunduvalt väiksem kui metallides. Voolukandjate kineetiline energia pooljuhtides aga kasvab temperatuuri mõjul intensiivsemalt. Erinevalt metallidest kasvab pooljuhtides temperatuuri tõusul kiiresti ka voolukandjate kontsentratsioon. Kui temperatuuri absoluutse nulli juures pole juhtivustsoonis ainsatki elektroni, siis juba toatemperatuuridel võib laengukandjate kontsentratsioon tõusta kuni  $10^{20}$  iga kuupsentimeetri kohta.

Need tähtsad erinevused pooljuhtide ja metallide vahel põhjustavad seda, et paljudes pooljuhtides võib täheldada termoelektromotoorseid jõude, mis kümneid kordi ületavad metallides esinevaid jõudusid. Seejuures toimub pooljuhis järgmine protsess. Voolukandjad, s. o. elektronid või augud, difundeeruvad pooljuhi kuumemast piirkonnast, kus nii nende kontsentratsioon kui ka kineetiline energia on suuremad, külmemasse piirkonda, kus nende kontsentratsioon ja kineetiline energia on väiksemad. Teiselt poolt liiguvad voolukandjad ka vastassuunas — külmast otsast kuumemasse. Kuid protsessi alguses, kuni dünaamilise tasakaalu tekkimiseni, on kuumast piirkonnast külmemasse piirkonda siirduvate voolukandjate arv suurem kui vastassuunas liikuvate oma. Sellise laetud osakeste liikumisele kaasneb küllalt kiiresti positiivse laengu ülekaal pooljuhi ühes ja negatiivse laengu ülekaal pooljuhi teises otsas. Laengute suurenemisega kasvab pooljuhi otste vahel ka potentsiaalivahe. Nagu ülalkäsitletud juhulgi, kus tegemist oli metallidega, nii ka siin hakkab tugevnev elektriväli pidurdama laetud osakeste difundeerumist kuumast otsast külmemasse. Pidurdamise tulemusel saabub teatava aja järel tasakaal: laengute kulgemine mõlemas suunas võrdsustub. Seejuures kujunev potentsiaalivahe võrduki termoelektromotoorse jõuga. Eriti rõhutatult ilmneb selles protsessis pooljuhi auk- ja elektronjuhtivuse mehhanism.

Aukpooljuhi kuum ots saab negatiivse ja külm — positiivse laengu, mis vastab aukude difusioonile kuumast piirkonnast külmemasse. Elektronpooljuhis täheldatakse vastupidist: kuum ots laadub positiivselt ja külm — negatiivselt, mis vastab elektronide difusioonile kuumast piirkonnast külmemasse.

Erinevalt metallidest on pooljuhtide termoelektromotoorse jõu tegur  $\alpha$  tunduvalt suurem: ta võib ületada 1 000 mikrovolti ühe kraadi kohta.

Ülalkäsitletust on selge, et teguri  $\alpha$  märk ja suurus sõltuvad pooljuhi juhtivusmehhanismist. Kui ainel on elektronjuhtivus, siis  $\alpha$  on negatiivne. Aukjuhtivusega ainetel on  $\alpha$  positiivne. Sega- või omajuhtivuse puhul määrab  $\alpha$  suuruse ja märgi terve rida tegureid, millede seas peamist osa etendavad voolukandjate (aukude või elektronide) liikuvus ja kontsentratsioon. Segajuhtivusega pooljuhil võib seetõttu  $\alpha$  olla nii positiivne kui ka negatiivne. Tema arvvärtus on alati väiksem kui ühese juhtivusega pooljuhtidel. Mõnikord erineb ta vähe nullist.

Termoelektromotoorse jõu suuna kindlakstegemisega saab järelikult määrata katsetatava pooljuhi elektrijuhtivuse mehhanismi.

Kui moodustada ahel kahest pooljuhist, milledest üks on auk- ja teine elektronjuhtivusega, ühendada sellesse elektrienergia tarbija ja seejärel kuumutada pooljuhtide kokkupuutekohta, siis tekib ahelas termoelektrivool. Kummaski harus tekkinud termovoolud  $I_-$  ja  $I_+$  seejuures liituvad, moodustades termopaari voolu  $I_0 = I_- + I_+$ . Paari termoelektromotoorse jõu tegur  $\alpha_0$  kujutab endast elektron- ja aukjuhtivusega harude vastavate tegurite summat, s. t.  $\alpha_0 = \alpha_- + \alpha_+$ . Säärase paari otstel tekib termoelektromotoorne jõud  $\varepsilon = \alpha_0 (T_2 - T_1) = (\alpha_- + \alpha_+) (T_2 - T_1)$ . Soojusenergia elektrienergiaks muundumise kasutegur on seda kõrgem, mida suuremad on elektriline erijuhtivus  $\sigma$  ja tegur  $\alpha$  ning mida väiksem on soojusejuhtivustegur  $\kappa$ . Kasuteguri ligikaudne avaldis on järgmine:

$$\eta \approx \frac{\sigma \alpha^2}{\kappa}.$$

Tegurite  $\sigma$ ,  $\alpha$  ja  $\kappa$  väärtustel on pooljuhtide puhul kasuteguri seisukohalt palju soodsamad väärtused kui nendel, mis esinevad metallide puhul.

Metallide elektriline erijuhtivus  $\sigma$  on tunduvalt suurem kui pooljuhtide oma, kuid pooljuhtide termoelektromotoorse jõu tegur ületab selle eest metallide vastava teguri kümneid ja isegi sadu kordi. Lisaks sellele on pooljuhtide soojusejuhtivus mitu korda halvem metallide soojusejuhtivusest. Kõige selle tagajärjeks ongi pooljuhtidest valmistatud termoelementide suhteliselt hea kasutegur, mis käesoleval ajal ulatub kuni 8%-ni.

### PELTIER' EFEKT

1834. aastal tegi prantsuse füüsik Jean Peltier eksperimenti, mille tulemuseks oli uus avastus füüsikas. Peltier koostas kahest metallvardast (üks vismutist ja teine vasest) ahela ja juhtis sellest läbi alalisvoolu. Seejuures ilmnes, et juhul, kui vool suundus vismutist vaske, tõusis jootekohaga temperatuur  $10^{\circ}\text{C}$  võrra. Voolu suuna muutmisel täheldati jootekohaga temperatuuri langust  $5^{\circ}\text{C}$  võrra. Koostanud ahela vismutist ja antimonist, märkas Peltier veelgi rabavamalt efekti: kui vool oli suunatud vismutist antimoni poole, kuuenes jootekoht  $37^{\circ}\text{C}$  võrra ja vastassuunalise voolu puhul langes sama jootekohaga temperatuur  $45^{\circ}\text{C}$  võrra.

Peltier' poolt avastatud nähtus osutus nii huvitavaks, et Peterburi füüsik E. H. Lenz alustas 1838. aastal selle lähemat uurimist. Seda õigustas veel asjaolu, et Peltier ise andis tema poolt avastatud nähte kohta täiesti ebaõige seletuse.

Uurinud hoolikalt Peltier efekti, õnnestus Lenzil mitmest metallist koosnevast süsteemist voolu läbi juhtides ühte jootekohta nii palju jahutada, et sellel olev veetilg külmus.

Peltier' efekti üksikasjaliku uurimise tulemusena avastati täiesti range seadusepärassus. Selgus nimelt, et jootekohas eralduv soojusehulk või vastassuunalise voolu puhul jootekohas neelduv soojusehulk  $Q$  on proportsionaalne vooluga  $I$  ja ajaga  $t$ , s. t.  $Q = \Pi It$ , kus täht  $\Pi$  tähistab Peltier' tegurit. Viimase arvväärnus võrdub säärase soojusehulgaga, mis eraldub või neeldub jootekohas, mida läbib üks laenguühik elektrit. Seejuures peab silmas pidama, et kõne all on soojus, mida jootekoht eraldab lisaks tavalisele Joule'i soojusele.

Peltier' teguri  $\Pi$  ja termoelektromotoorse jõu teguri  $\alpha$  vahel kehtib seos — need suurused on teineteisega proportsionaalsed. Järelikult ilmneb Peltier' efekt nagu termoelektrilised nähtusedki eriti teravalt just pooljuhtide kontaktis. Ja nii nagu termoelektergi, mis kuni pooljuhtidest termoelementide loomiseni ei etendanud mingit osa energeetikas, hakkab Peltier' efekt leidma tõsist praktilist rakendamist alles meie päevil.

## FOTOJUHTIVUS

Kui metallides võib juhtivust täheldada igasugusel temperatuuril, siis tavalistes tingimustes tekib pooljuhtide juhtivus ainult tänu soojusliikumisele. Kuid kohe selgub meile, et on võimalik luua sääraseid tingimusi, mis tagavad juhtivuse tekkimist pooljuhis ilma selle temperatuuri tõstmata. Kuna pooljuhis tekib elektri juhtivus ainult seetõttu, et tema juhtivustsooni satub elektrone, siis piisab juhtivuse tekitamiseks sellest, kui anda elektronidele nende vabasse tsooni üleviimiseks vajalik energia. Tavalistes tingimustes saavad elektronid selle energia teistelt, termilisest liikumisest osavõtvatelt osakestelt. Kuid see energia võib saabuda ka väljast, näiteks kiirguse näol.

Juba möödunud sajandil märgati, et seleenkepikese elektritakistus muutub suurtes piirides, olenevalt temale langevast valgusest. Täpsed uurimused näitasid, et seleeni takistus väheneb valguse tugevnemisel.

Hiljem õnnestus kindlaks teha, et selline omadus on mitte ainult seleenil, vaid ka mõnedel teistel pooljuhtidel. Kvantidemehaanika loomine andis võimaluse selgitada seda nähtust, mida teaduses hakati nimetama fotojuhtivuseks ehk sisefotoefektiks.

Fotojuhtivuse füüsikaline olemus seisab alljärgnevas. Olgu teatava temperatuuri juures viibival «pimendatud» pooljuhil vabas tsoonis  $n$  elektroni. Need elektronid põhjustavad aine tavalist elektri juhtivust, mida teisiti nimetatakse veel pimejuhtivuseks. Kui käsitletavat pooljuhti valgustada, siis ilmub vabasse tsooni lisaks seal juba esinevatele pimeelektronidele veel  $n_1$  fotoelektroni, nii et elektronide koguhulk vabas tsoonis on nüüd  $n + n_1$ . Selle tulemusel kasvab elektri juhtivus, mida võib väljendada avaldisega

$$\sigma = n e u + n_1 e u_1,$$

kus esimene liidetav tähistab pimejuhtivust ja teine — fotojuhtivust.

Fotoelektronide vabasse tsooni ilmumise põhjust saab selgitada järgmiselt. Lisanditeta pooljuhis on täidetud tsoon kahtlemata nii pime- kui ka fotoelektronidega varustajaks. Edasi on selge, et nii ühed kui teised elektronid pääsevad vabasse tsooni ainult seetõttu, et nad saavad energiat, mis on vajalik  $\Delta E$  laiuse keelatud tsooni ületamiseks. Fotojuhtivus tekib järelikult seetõttu, et pooljuhi pinnale langevad ja selle poolt neelatud footonid annavad kogu oma energia fotoelektronidele. Iga footon kannab energiat  $h\nu$ . Kui see energia osutub suuremaks, või äärmisel juhul võrdseks  $\Delta E$ -ga, siis võib elektron täidetud tsoonist juhtivustsooni pääseda. Siit järgneb, et fotojuhtivus osutub võimalikuks ainult siis, kui  $h\nu \geq \Delta E$ . Teiste sõnadega, iga valgusele reageeriva aine puhul esineb fotojuhtivuse piir, mis vastab tingimusele:

$$h\nu \geq \Delta E.$$

Kui pooljuhile langeva kiirguse sagedus  $\nu$  osutub väiksemaks teatavast piirväärtusest  $\nu_0$ , siis fotojuhtivust ei teki. Ainult see kiirgus, mille sagedus  $\nu > \nu_0$ , suudab fotojuhtivust põhjustada.

Fotoefekti piir, s. t. sageduse  $\nu_0$  suurus sõltub nii pooljuhist endast kui ka sellest, kas temas esineb lisandeid või mitte.

Fotojuhtivus ehk sisefotoefekt ei teki kaugeltki mitte kõikides pooljuhtides. Kuid sellest sõltumatult on fotojuhtivuse tekkimise vältimatuks tingimuseks aine poolt temale langeva kiirguse neelamine. Ainult sel puhul on fotoefekti tekkimine põhimõtteliselt võimalik.

Nõukogude füüsikud tegid katsete varal kindlaks, et fotoelektronid ei erine oma käitumiselt millegagi soojuselektronidest. Nende liikuvus langeb koguni praktiliselt ühte.

Sisefotoefekti hoolikas uurimine näitas, et mitmesuguste ainete elektrilise takistuse muutumist põhjustab erineva spektraalse koostisega kiirgus. Mõnede ainete elektriline takistus muutub ultraviolettkiirte toimel; teiste ainete takistus muutub nähtava valguse või infrapunaste kiirte toimel.

Valguse poolt vabastatud elektronid viibivad vabastsoonis väga lühikest aega. Seejärel satuvad nad aatomi-

tevahelistesse tühemetesse ja kui pooljuhi kahe punkti vahel esineb potentsiaalivahe, siis hakkavad nad liikuma peamiselt ühes suunas, moodustades elektrivoolu. Seepeale siirduvad fotoelektronid madalamatele lisandinivoo-  
dele või koguni täidetud tsooni. Kuid pooljuhi pideval valgustamisel tekib järjest uusi ja uusi fotoelektrone ja samal ajal tuleb neid teatav hulk ka tagasi. Kõige selle tulemusel tekib teatav dünaamiline tasakaal, s. t. tekkivate fotoelektronide hulk muutub võrdseks tagasitulevate elektronide hulga.

Vabas olekus on fotoelektronid erakordselt lühikest aega ( $10^{-3}$  kuni  $10^{-7}$  sekundi piires). Kuid sellegi lühikese «eluea» jooksul osutuvad nad täisväärtuslikeks juhtivuse elektronideks. Pooljuhtide elektrijuhtivus võib tunduvalt suureneada mitte ainult kiirguse toimele. Mistahes osakene, mis satub mõnda pooljuhti moodustavasse aatomisse ja annab seejuures elektronile kogu oma energia, võib elektroni vabasse seisundisse viia. Tõepoolest, hulgalised, mitmekordselt korratud katsed näitavad, et juhtivus tekib ka siis, kui aine pinda pommitada kiirete elektronidega, alfaosakestega, prootonitega, deutonitega ja teiste aineosakestega. «Pommidena» kasutatavate osakeste energia peab seejuures endasmõistetavalt ületama energiahulga, mis on vajalik elektroni vabasse seisundisse viimiseks.

Pooljuhtides on juhtivuselektronide kontsentratsioon toatemperatuuril tunduvalt madalam kui metallidel. Valguse toimele ilmuvate fotoelektronide arv on aga suhteliselt suur. Sobiva valgustuse puhul võib fotoelektronide arv mõningates ainetes, näiteks kadmiumsulfiidis (CdS), ületada pimeelektronide arvu kümneid tuhandeid kordi. Teistes, valgusele vähemreageerivates ainetes võib fotoelektronide arv mitte väga intensiivse kiirituse puhul ulatuda 20—30%-ni juhtivuselektronide üldarvust. See teatavate pooljuhtide omadus teeb nad väga tähtsateks ja hädavajalikeks materjalideks.

### TÖKKEKIHI-FOTOEFEKT

Eelmises paragrahvis näidati, et elektronid võivad neeldunud valguse toimele siirduda täidetud tsoonist vabasse tsooni, luues sel viisil fotojuhtivuse. Seejuures tekib pooljuhis ainult lisajuhtivus, ilma igasuguste sisemiste elektro-

motoorsete jõududeta. Kuid füüsikutel on tuntud veel teistsugune nähtus — elektromotoorsete jõudude tekkimine pooljuhi valgustamise tagajärjel. Kui näiteks valgustada pooljuhti ebaühtlaselt, nii et üks katsekeha osa oleks tunduvalt rohkem valgustatud kui teised, siis võib real juhtudel kindlaks teha potentsiaalivahet valgustatud ja valgustamata piirkondade vahel. See nähtus seletub asjaoluga, et kui valgus langeb pooljuhile, hakkab elektrone valgustatud piirkondadest pimedatesse difundeerima suuremal hulgal kui vastassuunas. Säärane eelisdifusioon põhjustab seda, et valgustamata piirkonnad saavad elektronjuhtivuse mehhanismi korral negatiivse ja valgustatud piirkonnad — positiivse laengu. Laengute kuhjumise tulemusel tekib pooljuhis pidevalt tugevnev elektriväli, mis lõppude lõpuks loob tasakaaluolukorra, kus elektronide voolamine mõlemas suunas võrdsustub. Tasakaalu saabumisel on pooljuhi valgustatud ja valgustamata piirkondade vahel tekkinud teatav potentsiaalivahe, mille suurus ulatub mõnikord kuni 0,2 voldini.

Kuid kõige huvitavam nähtus, mis pooljuhtides valguse toimel tekib, on nn. tõkkekihi-fotoefekt. Oksüdeerime vaskplaadikese, moodustades selle pinnal kuprooksüüdi ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) kihi, mis osutub teatavasti tüüpiliseks pooljuhiks. Kanne seeläbi kuprooksüüdi pinnale õhukese metallikihi — näiteks hõbedakihi. Nagu teada, on õhukesed metallikihid poolläbipaistvad. Nüüd koostame lihtsa vooluringi: ühendame galvanomeetri ühe klemmi hõbedakihi ja teise — vaskpladikese. Selles vooluringis ei ole seega ühtegi vooluallikat. Kui aga juhtida ülemisele, poolläbipaistvale hõbedakihi valgusvoog, siis nihkub galvanomeetri osuti null-asendist kaugemale välja, sest vooluringi läbib vool. Seda nähtust põhjustab süsteemis metall—pooljuht esinev tõkkekiht.

Käsitletaval juhul läbivad elektronid valguse toimel tõkestava kihi ja siirduvad kuprooksüüdist vasesse. Vaskpladikene saab järelikult negatiivse ja poolläbipaistev hõbe-elektrood — positiivse laengu. Kuprooksüüdi välispinna valgusega kiiritamine põhjustab seega vooluringis voolu. Analogilist nähet võib täheldada ka teiste pooljuhtide puhul. Eriti tugeval kujul esineb see efekt süsteemides, kus esinevad säärased pooljuhid nagu talliumsulfiid, hõbesulfiid, seleen, germaanium, räni või kadmiumsulfiid.

Elektromotoorse jõu või elektrivoolu tekkimist valguse toimel süsteemides, mis koosnevad elektron- ja aukpooljuhtidest, tõkkekihist ning metallektroodidest, nimetatakse tõkkekihi-fotoefektiks ehk ventiil-fotoefektiks.

Missugune on ventiil-fotoefekti olemus? Selle nähte mehhanismi võib jaotada mitmesse etappi. Esimene etapp on järgmine. Neeldunud valgus vabastab pooljuhis üheaegselt nii elektrone kui ka auke, moodustades sel viisil elektronidest ja aukudest paare. Paaride vabanemise tulemusel paisatakse täidetud tsooni elektrone vabasse tsooni, kus nad juhtivuselektronideks muutuvad. Augud, mis jäävad täidetud tsooni, saavad samuti võimaluse elektrijuhtimisest osa võtta.

Kui valgus neelduks ühes ainsas pooljuhis, mis ei ole kontaktis ühegi teise pooljuhiga, siis valguse toimel tekkinud paarid ainult suurendaksid antud pooljuhi juhtivust ja sellega lõpeks kogu asi. Sootuks teistsugune on olukord meie poolt käsitletavas süsteemis, mis koosneb elektronjuhtivusega pooljuhtidest (tähistatakse tähega  $n$ ) ja aukjuhtivusega pooljuhtidest (tähis  $p$ ). Erinevat tüüpi pooljuhtide vahel asetseb teatavasti tõkkekiht. Kontakt, mis leiab aset  $p$ - ja  $n$ -pooljuhtide vahel, põhjustab nende vahel kontakt-elektrivälja tekkimist. Ja kui aukpooljuhi väljumistöö osutub elektronpooljuhi väljumistööst suuremaks (kahe, ühesuguse keemilise koostisega pooljuhi puhul on see alati nii), siis on see kontaktelektriväli suunatud elektronpooljuhist aukpooljuhi suunas. Mis sünnib sel puhul neeldunud valguse poolt vabastatud paaridega? On ilmne, et mittepõhilised voolukandjad, s. t. elektronid aukpooljuhis või augud elektronpooljuhis, siirduvad kontaktelektrivälja toimel läbi tõkkekihi ühest pooljuhist teise. Selle tõttu suureneb nende hulk vaadeldava süsteemi ühes osas, samal ajal kui süsteemi teise ossa kuhjub põhilisi voolukandjaid. Tähendab, valguse poolt moodustatud paarid hakkavad lagunema: elektronid koonduvad elektron- ja augud — aukpooljuhti. Niisugune koondumine ei saa toimuda piiramatult seetõttu, et paralleelselt elektronide ja aukude kontsentratsiooni suurenemisega vastavates pooljuhtides kasvab nende tekitatud elektriväli. Viimane aga takistab mittepõhiliste voolukandjate liikumist läbi tõkkekihi ühest pooljuhist teise. Samal ajal koos elektrivälja tugevnemisega suureneb ka mittepõhiliste fotovoolukandjate tagasi-vool. Dünaamiline tasakaal saabub siis, kui mittepõhiliste

voolukandjate hulk, mis ajaühikus läbi tõkkekihi siirdub, osutub vastassuunas liikuvate samasuguste volukandjate hulgaga võrdseks. Sel puhul jääb ülemise ja alumise elekt-roodi vahel püsima teatav lõplik potentsiaalivahe, mis kujutabki endast fotoelektromotoorset jõudu.

Dünaamilise tasakaalu tekkimisest rääkides tuleb sil-mas pidada, et valgustatud pooljuhist läbi tõkkekihi teise pooljuhti ajaühikus siirduvate mittepõhiliste fotovoolu-kandjate arv  $N$  sõltub valgusvoo intensiivsusest. Viimase suurenemisega kasvab ka  $N$ . Algul toimub see suurene-mine lineaarselt, kuid hiljem jääb fotovoolukandjate arvu suurenemine ikka enam ja enam maha, kuni tekib täielik küllastus. Fotoelektromotoorse jõu suurus, mis meile pea-mist huvi pakub, kulgeb kooskõlas fotovoolukandjate arvu muutumisega valgusvoo intensiivsuse toimel.

Säärane on kõige üldisemates joontes fotoelektro-motoorse jõu tekkemehhanism süsteemis, mis koosneb  $p$ - ja  $n$ -pooljuhist ning nende vahel paiknevast tõkke-kihist.

Ventiil-fotoefekt kulgeb eriti intensiivselt säärastes pooljuhtide süsteemides, kus mittepõhiliste volukandjate difusioonipikkus on suur ja vastavalt sellele nende «eluga» — pikk.

Jälgime mõne mittepõhilise volukandja (olgu see näi-teks elektron aukpooljuhis) käitumist. Pärast oma «süüdi» pooljuhi punktis  $K$  viibib elektron vabas seisundis teatava aja  $\tau$  vältel, mis moodustabki elektroni «eluea». Selles ajavahemikus talub elektron suure hulga kokkupõrkeid teiste elektronidega või aatomitega. Teekonna pikkust, mida elektron läbib kahe järjekordse kokkupõrke vahel, nimetatakse vaba teekonna pikkuseks. Tähistame selle tähi-sega  $Al$ . Oma eluea  $\tau$  jooksul liigub elektron mööda mur-tud joont, mis koosneb  $Al$ -pikkustest lõikudest. Põhimõtte-liselt võivad need lõigud olla erineva pikkusega. Kogutee-konna pikkus koosneb üksikute lõikude pikkuste summast, s. t.  $l = \Sigma Al$ .

Aja  $\tau$  möödumisel satub elektron pooljuhi punkti  $M$ , kus ta rekombineerub. Rekombinatsioon seisab selles, et elekt-ron satub uuesti mõnele täidetud tsooni vabale nivoole. Kuid kuni rekombineerumiseni on elektron oma eluea  $\tau$  vältel suutnud liikuda kaugusele  $L$ , mis lahutab punkti  $M$  punktist  $K$  (möödetuna piki sirgjoont). Kaugust  $L$  nimetatakse mittepõhiliste volukandjate difusioonipikku-

seks. Puhhteoreetilistest kaalutlustest lähtudes on leitud, et  $L = 1/6 l$ .

Nii mittepõhiliste voolukandjate difusioonipikkus  $L$  kui ka nende eluiga  $\tau$  osutuvad pooljuhi tähtsateks parameetriteks.

Ventiil-fotoelektromotoorse jõu tekkemehhanismi käsitlemisest selgub, et see elektrood, mis elektronpooljuhiga vahetult kontaktis on, saab alati negatiivse laengu. Samal ajal laadub aukpooljuhiga kontaktis olev elektrood positiivselt. Erinevat tüüpi ventiil-fotoelementides võib ülemine, poolläbipaistev elektrood saada seetõttu nii positiivse kui ka negatiivse laengu.

Tõkkekihi fotoefekti avastamine laiendas pooljuhtide praktilise kasutamise võimalusi ja on aluseks kiirgusenergiat vahetult elektrienergiaks muundavate seadmete, nn. ventiil-fotoelementide ehitamisel.

## TEINE PEATÜKK

### POOLJUHTALDAJAD JA -VÕIMENDAJAD

#### SELEENALDAJAD

Seleenelement on üks esimesi tahkeid vahelduvvoolualaldajaid. Tema karakteristiku mittelineaarsus avastati juba 1876. aastal. Kuid seleenalaldaja esimesed tööstuslikud mudelid ilmusid alles 1924. aastal.

Tänapäeva tehnikas kasutatakse seleenalaldajaid väga laialdaselt ja neid toodetakse suurtes kogustes kõikides maailma maades.

Hea kvaliteediga alaldajate saamiseks kasutatakse keemiliselt puhast seleeni (99,99%). Seleeni on keemiline element, mis paikneb perioodilise süsteemi VI rühmas. Tema järjekorranumber on 34, aatomkaal — 78,96. Oma keemilistelt omadustelt ligineb seleeni väävlile. Ta on pooljuht. Seleenalaldajas kasutatavate ketaste valmistamiseks võetakse algul amorfses seleeni, mis termilise töötlemisega muundatakse kristallilise struktuuriga  $\beta$ -modifikatsiooniks.

Alaldaja seleenketaste valmistamise tehnoloogia on lihtne. Pehmest Armco-rauast stantsitakse ümmargused kettad, mida kasutatakse alaldaja alumiseks elektroodiks.

Ketaste läbimõõt määratakse sõltuvalt ehitatava alaldaja tüübist, s. t. kettaid läbiva voolu tugevusest. Standardmöödetega ketaste läbimõõduks on tavaliselt kas 5, 7, 18, 25, 35, 45, 60, 80, 100 või 112 mm. Ketaste paksus on 0,8 kuni 1 mm. Ketaste keskele stantsitakse auk montaažpoldi jaoks.

Väljastantsitud kettad pestakse ja töödeldakse siis liivapriitsiga selleks, et nende pinnad muutuksid karedaks. Seejärel kettad nikeldatakse. Ketastele tekkiv niklikiht jääb samuti karedaks, mistõttu hiljem seleen hästi peale püsima jääb. Alumiseks elektroodiks ei või kasutada iga juhuslikku metalli. Katsed on näidanud, et parimaid tulemusi saadakse siis, kui alumise elektroodi materjaliks on nikeldatud raud. Teised metallid annavad seleeniga kokku puutudes suure elektrilise takistusega keemilisi ühendeid, mis alaldajat läbiva voolu tugevusele halvasti mõjuks. Lisaks sellele esineb muudest metallidest valmistatud ketastel vananemisprotsess, s. t. alaldamisomaduste langus aja jooksul, märksa intensiivsemalt.

Nikeldatud kettad asetatakse kuumale plaadile ja kuumutatakse 3—5 minuti jooksul temperatuuril 230—250° C. Seejärel hõõrutakse ketaste pinda amorfsest seleenist valmistatud pulgakeseaga. Kokku puutudes kuumendatud ketastega sulab tahke amorfne seleen ja katab ketaste pinna. Sel viisil saadava kihi paksus ei osutu aga küllalt ühtlaseks. Edasi võetakse kettad plaadilt ära ja jahutatakse. Ketastele tekkinud seleenikihi paksuse ühtlustamiseks pressitakse seleeniga kaetud kettaid 130° C juures 10 kg/cm<sup>2</sup> surve all. Seleen, mille temperatuur on pressimisel üle 100° C, pehmeneb, teda surutakse osaliselt välja, ja ta katab lõpuks ketta ühtlase, 0,1 mm paksuse kihina. Survega töötlemise protsessi kestuseks on 7 kuni 12 minutit.

Seeleni amorfse modifikatsiooni elektriline eritakistus on umbes 10<sup>8</sup> Ωcm. On selge, et niisugune takistus piiraks otsevoolu tugevust. Seetõttu vähendatakse seeleni eritakistust eriliste tehnoloogiliste võtete abil. Esimene vähendamine toimub äsjakirjeldatud survega töötlemisel, mille jooksul amorfne seleen läheb üle β-modifikatsiooni. Viimasel on kristalliline struktuur ja tema eritakistusteks on 10<sup>5</sup> Ωcm. Edasi asetatakse kettad 1,5—2 tunniks termostaati, milles temperatuur püsib 215° C juures. See operatsioon vähendab seeleni eritakistust 10<sup>4</sup> kuni 10<sup>3</sup> Ωcm.

Siinkirjeldatud meetod seleeni pealekandmiseks alumisele elektroodile pole muidugi mitte ainus võimalik. On olemas ka teisi mooduseid.

Edasi kantakse seleeni pinnale pealmine metallektrood. Pealmise elektroodi materjalil on samuti oluline tähtsus. Parimaid tulemusi annab muuhulgas sulam koostisega 53% vismutit (Bi), 24% kadmiumi (Cd) ja 23% tina (Sn). Selle sulami sulamistemperatuur on väga madal, umbes 105° C, mis võimaldab teda peale kanda pulveriseerimise teel. Vedel sulam juhitakse erilises aparaadis vastavasse pihustisse, haaratakse kaasa komprimeeritud õhu joa poolt ning pihustatakse ülipeenteks piisakesteks, mis sadestuvad seleeni pinnale.

Kui kõik tehnoloogilised protsessid, mis on vajalikud alaldaja ketaste valmistamiseks, on lõppenud, lähevad kettad formeerimisele. Formeerimiseks lastakse ketastest umbes poole tunni jooksul läbi voolu vastassuunas, suurendades seejuures pidevalt pinget. Formeerimisel saab tõkkekiht oma lõplikud omadused ja stabiliseerub. Formeerimine vähendab küll teataval määral ka otsevoolu, kuid vastuvoolu pidurdab ta selle eest väga tugevalt. Seega parandab formeerimine tunduvalt alaldaja ketaste elektrilisi omadusi. Kirjeldatud formeerimisrežiim annab ainult üldise ja põhimõttelise ettekujutise alaldajaketaste valmistamise viimasest etapist.

Seleenalaldajas luuakse tõkkekiht järk-järgult pärast seda, kui seleeni pinnale on kantud pealmine elektrood. Formeerimine aitab selleks omakorda kaasa. Formeerimise vältel tekib seleeni välispinnale õhuke kadmiumseleniidi kiht, millel on elektronjuhtivus. Kuna pealmine elektrood kujutab endast kolmiksulamit, milles esineb ka kadmium, siis astub viimane formeerimise ajal aktiivsemasse reaktsiooni seleeniga. Seleenalaldaja osutub sisuliselt seega keerukaks süsteemiks. Selles süsteemis kontakteerub aukjuhtivusega seleen kadmiumseleniidiga, millel on elektronjuhtivus. Nende vahele tekib tõkkekiht, mis oluliselt määrab seleenalaldaja volt-amper-karakteristiku.

Joonisel 9 on kujutatud standardse seleenketta volt-amper-karakteristik. Avasuund kõikidel seleenalaldajatel vastab plussile alumisel ja miinusele pealmisel elektroodil, mis on kooskõlas seleeni aukjuhtivusmehhanismiga.

Tööstuslikult toodetavate seleenalaldaja ketaste elektrilised parameetrid on tavaliselt järgmised: läbilüüv vastu-

pinge (pinge, mille puhul alaldaja läbi lüüakse ja rikutakse) — ligikaudu 30 V; maksimaalne töö-vastupinge — 18 V; pingelang kettas avasuunas, minimaalse koormuse ja staatilise režiimi korral, mitte üle 1,3 V. Lubatav voolutihedus avasuunas on umbes 50 mA/cm<sup>2</sup>.

Alaldaja kettad koondatakse sammasteks, mida võib ühendada järjestikku, paralleelselt või rühmiti (segaihendus). Rühm kokkuühendatud sambaid või ka üksik sammu moodustavad alaldusagregaadi.

Alaldaja kasutegurit võib tõsta pooljuhtiva kihi paksuse vähendamisega, mis aga on seotud tõsiste tehnoloogiliste raskustega. Pooljuhtivate kihtide paksuse vähendamine on piiratud nõudega, et tõkkekihi paksus ei tohi langeda palju alla 10<sup>-5</sup> cm. Vastasel korral lakkab tõkkekiht oma ülesannet täitmast.

Võimalus valmistada alaldajaid uutest pooljuhtivatest materjalidest, millede eritakistus on väiksem kui seleenil või kuprooksüidil, on ahvatlev. Kuid ka siin esinevad oma piirid, kuna tõkkekihi paksus on vahetult seotud pooljuhi eritakistusega:

$$d = B\sqrt{\rho},$$

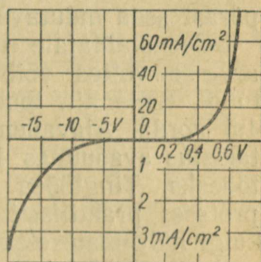
kus  $d$  — tõkkekihi paksus;

$B$  — konstant, mille väärtus on umbes 10<sup>-7</sup> cm<sup>1/2</sup>Ω<sup>-1/2</sup>;

$\rho$  — pooljuhi elektriline eritakistus.

Seleenalaldajad on laialdaselt levinud ja neid kasutatakse paljudes tehnikaharudes.

Kuna pooljuhtide takistus sõltub küllalt tugevasti temperatuurist, siis peaks ka seleenalaldaja töörežiim temperatuurist sõltuma. Ja tõepoolest, väliskeskkonna temperatuuri langedes tõuseb seleenalaldaja sisetakistus, mistõttu suureneb pingelang ventiilil ja järelikult väheneb selle kasutegur. Temperatuuri ülemäärane tõus on samuti lubamatu, sest ülekuumenemine võib alaldaja kettaid rikkuda. Seleenalaldaja töötab normaalselt siis, kui välistemperatuur asub —45 kuni +75° C piirides. Kõrgendatud temperatuuri tingimustes töötavat alaldajat tuleb jahutada, näiteks õhujoaga.



Joon. 9. Seleenalaldaja staatiline volt-ampere-karakteristik.

Seleenist alaldajakettad «vananevad» aja jooksul, s. t. töötava seleenketta takistus avasuunas pidevalt suureneb ja tõkkesuunas väheneb. Vananemise tulemuseks on alaldamisteguri ja kasuteguri langus. Kõrge välistemperatuuri puhul kulgeb vananemisprotsess kiiremini. Kui alaldaja töötab väikese koormusega ja toatemperatuuril, siis lõpeb vananemisprotsess esimese 4000 töötunni jooksul ja pärast seda muutuvad alaldaja omadused püsivamateks.

Seleenalaldajate tööiga on küllalt kõrge. Vananemist arvesse võttes võib seleenalaldaja töötada kuni 40 000 tundi. Selle aja jooksul kasvab tema takistus avasuunas 1,5 korda. Ajavahemikku, mille jooksul ketta elektriline takistus avasuunas 1,5-kordseks kasvab, nimetatakse tingtööeaaks. Tingtööea ületanud seleenalaldajate vananemisprotsess praktiliselt katkeb ja nad jätkavad töötamist, kuigi halvemate elektriliste parameetritega.

Seleenalaldajate nagu muuseas ka kõigi teiste plaatidest koostatud pooljuhtalaldajate omamahtuvus on suur, umbes  $0,02 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ , mis takistab nende kasutamist kõrgesagedusahelates. Seetõttu on seleenalaldajad leidnud laialdast kasutamist ainult madalsagedusvoolude alaldamisel.

Hoolimata reast puudustest võistlevad seleenalaldajad edukalt nii elektronalaldajatega — kenotronide ja gasotronidega — kui ka mootor-generaatorite ja muud liiki muundajatega. Seleenalaldajate põhilisteks paremusteks on nende suhteliselt kõrge kasutegur, lihtne valmistamisviis, kütteahelate puudumine, suhteliselt väikesed gabariidid, pikk tööiga jne.

## KUPROKSALALDAJAD

Kuprooksüüd- ehk kuproksalaldajad on samuti leidnud laialdast kasutamist. Kõrgekvaliteediliste kuproksalaldajate saamise üheks tingimuseks on peale õige valmistamistehnoloogia veel eriti puhta vase kasutamine.

1 mm paksusest vaskplekist stantsitakse vajalike mõõtudega kettad, millede keskel on väikese läbimõõduga auk montaažpoldi jaoks. Väljastantsitud kettad puhastatakse hoolikalt ja pestakse põhjalikult, algul 30% seebikivilahuses ja seejärel voolavas vees (selleks et vaske rasvast, õlist jne. täielikult puhastada). Seebikivilahuses töödeldud kettad kastetakse 15 sekundiks kontsentreeritud lämmastikhappesse, pestakse seejärel 3—5 minutit voola-

vas, soovitavalt destilleeritud vees. Pesemisele järgneb ketaste kuivatamine filterpaberil või termostaadis. Valmistatavate alaldajate elektriliste parameetrite parandamiseks soovitatakse veel kettaid pärast kuivatamist lõõmutada kolm tundi vaakuumis temperatuuril  $600^{\circ}\text{C}$ .

Sellele järgneb peaoperatsioon: pestud ja kuivatatud kettad asetatakse paarikaupa kuumuskindlast terasest alusele ja viiakse koos sellega elektriahju, milles hoitakse temperatuur  $1020\text{--}1040^{\circ}\text{C}$ . Ahju temperatuuri jälgitakse hoolikalt püromeetri abil. Suurte läbimõõtudega kettad asetatakse ahju mitte metallalusel, vaid terasvardale lükitult.

Ahjus kattuvad vaskketaste välisküljed 10—15 minuti jooksul umbes 0,1 mm paksuse kuprooksüüdi kihiga. Ketaste siseküljed, mis asuvad vastu metallalust, praktiliselt ei oksüdeeru, sest hapniku juurdepääs nende pinnale on takistatud. Täpsemalt öeldes on säärase pakkimisviisi korral need kettad, mis vahetult metallalusel asuvad, lihtsalt omapärasteks alusplaatideks. Nad on seks otstarbeks spetsiaalselt ette nähtud ja neid kasutatakse korduvalt pikema aja kestel.

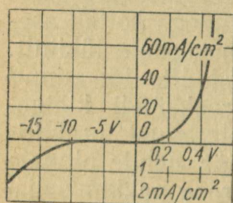
Oksüdeerimise vältel on ahju temperatuuri hoolikas ja täpne kontrollimine hädavajalik, sest vask sulab juba  $1080^{\circ}\text{C}$  juures, nii et suhteliselt väikene ülekuumutamine tooks endaga kaasa ketaste hävimise.

$\text{Cu}_2\text{O}$  elektrilised omadused sõltuvad suurel määral kuumutamisele järgnevast jahutamismenetlusest. Parimate tulemuste saavutamiseks võetakse kettad ahjust välja ja viiakse kiiresti üle teise, kõrvalseisvasse ahju. Viimases toimub sujuv üleminek oksüdeerimistemperatuurilt madalamale temperatuurile, mille juures saadakse parim lisandite jaotus  $\text{Cu}_2\text{O}$  kihis. Otse- ja vastuvoolu suurusele mõjuvad nii teise ahju temperatuur kui ka kuproksketaste ahjus viibimise kestus. Teises ahjus on temperatuur tavaliselt  $450\text{--}600^{\circ}\text{C}$  piires. Sõltuvalt nende mõõdetest hoitakse kettaid seal 8—15 minutit, millele otsekohe järgneb jahutamine külmas, voolavas vees.

Teises ahjus viibimise ajal tekib kuprooksüüdi ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) kihile halvasti voolu juhtiv kuprioksüüdi ( $\text{CuO}$ ) kiht. Viimase eemaldamiseks hoitakse kettaid 3—5 minutit lämmastikhappe ( $\text{HNO}_3$ ) 40%-lises lahuses. Seejärel kettad pestakse ja kuivatatakse. Pealmist elektroodi saab valmistada mitmel viisil. Toome siin ühe nendest. Valmistatakse sellaki 7,5%-line lahus etüülpiirituses. Sellakilahuse 70

kaaluosale lisandatakse 30 kaaluosa peent grafiidipulbrit. Segu hõõrutakse korralikult läbi ja sellega kaetakse ketal asuva kuprooksüüdi välispind. Pärast grafiidikihi kuivamist kantakse sellele pulveriseerimise teel metallikiht.

Kui ülalkirjeldatud viisil valmistatud kuprokskettale rakendada pinge, s. t. moodustada vooluring akumulatoorist, ampermeetrist, ja alaldajakettast, siis läbib ketast märgatav vool ainult ühes (ava-) suunas. Tõkkesuunas osutub vool tunduvalt nõrgemaks.

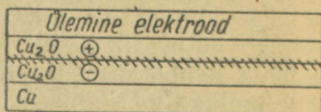


Joon. 10. Kuproksalaldaja staatiline volt-amper-karakteristik.

Avasuunale vastab miinus vasel, s. t. alumisel elektroodil, ja pluss — pealmisel elektroodil. See tähendab, et avasuunas liigub intensiivselt elektrone vasest kuprooksüüdi. Sama pinge puhul ajaühikus vastassuunas liikuvate elektronide arv on aga tunduvalt väiksem.

Joonisel 10 on toodud tüüpilise alaldava kuproksplaadikese volt-amper-karakteristik.

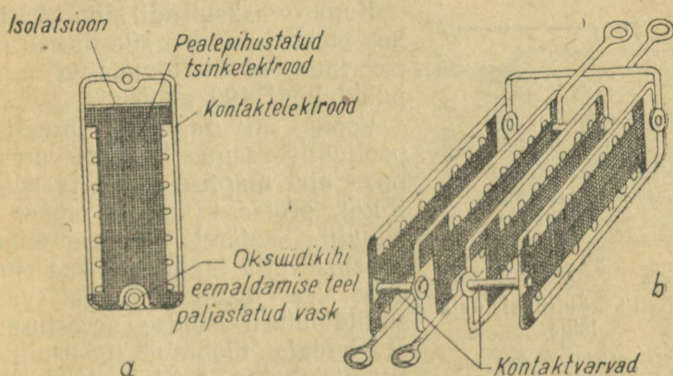
Erinevalt seleenalaldajatest, kus tõkkekiht asub pealmise elektroodi läheduses, paikneb kuproksalaldajates tõkkekiht alumise elektroodi ligidal. Tema tekkeprotsess on järgmine. Vaskketta oksüdeerimisel esimeses ja tema järgneval jahutamisel teises ahjus tekkiv kuprooksüüdiikiht ei ole oma elektriliste omaduste poolest homogeenne. Vasega vahetult kokkupuutes olev kuprooksüüdiikiht küllastub vasest. See tähendab, et kuprooksüüdiikihi teatavas paksuses esineb lisandina vase aatomeid, mis annavad talle elektronjuhtivuse. Kuprooksüüdi väliskihitides esineb lisandina aga hapnikuaatomeid, millest on tingitud selle kihi aukjuhtivus. Seega kujutab kogu kuprooksüüdiikiht endast omapärast kihilist moodustist, mis koosneb auk- ja elektronjuhtivusega kihitdest. Nende vahele kujuneb unipolaarset juhtivust põhjustav tõkkekiht (joon. 11).



Joon. 11. Kuproksalaldaja skemaatiline ehitus (viirutatud osa kujutab tõkkekihti).

Alaldaja ülaltoodud konstruktsiooni puhul kasutatakse ainult plaadikese ühte külge, kuna selle teine külg täidab lihtsalt väljeklemmi osa. Käesoleval ajal valmistatakse alal-

dajaid ka kahelt poolt kuprooksüüdiga kaetud plaatidest. Säärastest plaatidest koostatakse tavaliselt suurte voolude jaoks määratud alaldaja. Kahelt poolt kaetud plaatide valmistamiseks viiakse vasest plaadikesed ahju, kus oksüdeerumine toimub korraga mõlemal küljel. Kahepoolsete plaatide ja ventiilirühma konstruktsioon on toodud joonisel 12.



Joon. 12. Kahepoolne kuproksplaat (a) ja kahepoolsetest plaatidest koostatud kuproksventiilirühm (b).

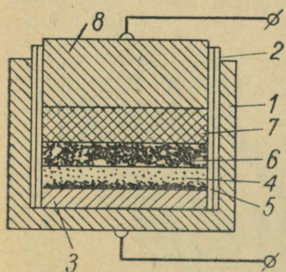
Kuproksalaldaja kettad või plaadid monteeritakse kokku sammasteks. Olenevalt alaldaja kasutamisetstarbest ühendatakse sambad järjestikku, paralleelselt või rühmiti.

Ülalkirjeldatud viisil valmistatud kuproksalaldaja plaadid, ühendatult vooluringi, vananevad aja jooksul. Selleks et kuproksplaadid oleksid töötamisel stabiilsemad, vanandatakse neid kunstlikult: kohe pärast valmistamist asetatakse plaadid termostaati, milles nende aldamisomadused stabiiliseeruvad.

### SULFIIDALALDAJAD

Neljakümnendate aastate algul hakkas meie tööstus välja laskma uut tüüpi vasksulfiidist tahkeid pooljuhtalaldajaid, mida nimetatakse sulfiidalaldajaiks. Säärase alaldaja valmistamiseks võetakse alumiiniumist kapsel, mille põhja asetatakse 1,5—2 mm paksune magneesiumketas. Kapsli seinad isoleeritakse vilgukivilehtedega ja tema sisse panakse umbes 1 g pulbrit, mis koosneb 60 kaaluosast vask-

sulfiidist (CuS), 25 kaaluosast väävlist ja 15 kaaluosast šamottpulbrist. Seejärel asetatakse kapsel pressi alla ja pooljuhtiv pulber pressitakse aeglaselt metalltempli abil kokku. Survejõud pressis tõuseb kuni 5000 kilogrammini. Pressimise ajal juhitakse pulbriga täidetud kapslist läbi 12—14 voldise pingega vahelduvvoolu, mis valmistatava alaldaja formeerib.



Joon. 13. Sulfiidalaldaja lõige

1 — alumiiniumkapsel; 2 — vilgukivivooder; 3 — magneesiumketas; 4 — pooljuhtiv segu; 5 — tõkkekiht; 6 — CuS-kiht; 7 — grafiitseib; 8 — alumiiniumist kork.

Kuna vasksulfiidil on küllalt hea elektrijuhtivus, siis tõuseb formeerimisvool ülalnimetatud pingepuhul kuni 100 amprini.

Voolu all tabletiksi pressitav pooljuhtiv segu keevitub pressimise ajal magneesiumketta külge. Kogu protsess kestab umbes 10 minutit. Seejärel võetakse tempel kapslist välja ja puistatakse sinna sisse veel teataval hulgal vasksulfiidipulbrit, sellise arvestusega, et alaldaja tööpinna iga ruutsentimeetri kohta tuleks umbes 1—1,2 g pooljuhtivat ainet. Sissepuitatud pulber kaetakse kõvagrafiidist valmistatud seibiga, mille peale surutakse alumiiniumist kork

(joon. 13). Sääraselt koostatud alaldaja asetatakse uuesti pressi alla, kusjuures pressimine toimub jällegi voolu all. Kuid erinevalt esimesest operatsioonist ei ole pressi survejõud seekord üle 2500 kilogrammi. Ka formeerimispinget vähendatakse 12—14 voldilt 8—10 voldini. Pressimine kestab nagu eelmisel juhulgi 10 minutit.

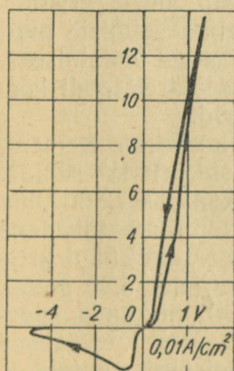
Voolu all toimuvate pressimiste ajal moodustub magneesiumketta lähedal olevas tsoonis tõkkekiht. Oletatakse, et formeerimise ajal, mil kapsel kuumeneb, toimub CuS reageerimine magneesiumiga. Selle tulemusel muutub magneesiumketta vastas paikneva pooljuhikihi juhtivusmehhanism. Seega esineb siingi kontakt elektron- ja aukjuhtivusega vasksulfiidi vahel ning nende lahutuspinnas tekib järelikult tõkkekiht.

Sulfiidalaldaja on arvestatud madalatele pingetele, kuid suurtele voolutihedustele, mis võivad ulatuda kuni 10 A/cm<sup>2</sup>. Võrreldes seleen- ja kuproksalaldajatega on nende kasutegur märgatavalt väiksem ega ületa 65%.

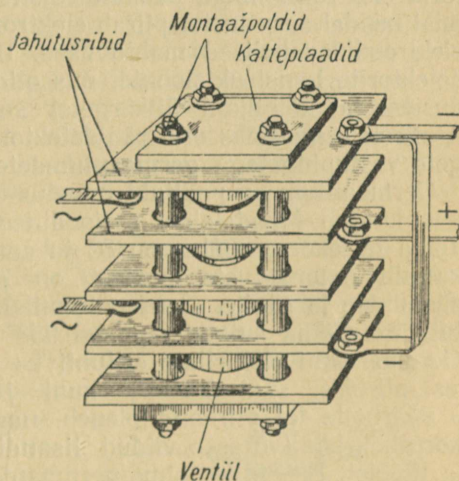
Sulfiidalaldajad on niiskuse suhtes tundlikumad kui seleenalaldajad.

Sulfiidalaldajate tööiga sõltub suurel määral nende ekspluateerimise režiimist. Normaalse ekspluateerimise korral, kus kapslite temperatuur ei ületa  $90^{\circ}\text{C}$ , võib aladaja töötada mitu tuhat tundi.

Joonisel 14 on näidatud sulfiidelemendi volt-ampere karakteristik.



Joon 14. Sulfiidalaldaja volt-ampere karakteristik.



Joon. 15. Sulfiidsammas.

Sarnaselt varemkirjeldatud tüüpidele koondatakse ka sulfiidelemendid sammastesse (joon. 15), mis ühendatakse järjestikku, paralleelselt või rühmiti. Joonisel 15 kujutatud sammas võimaldab saada kuni 40 amprist alaldatud voolu. Hoolimata madalast kasutegurist on sulfiidaladaja kasutamine real juhtudel täiesti õigustatud.

## POOLJUHTDIOODID

Raadiotehnika koidikul etendas kristalldetektor tähtsat osa, sest ta võimaldas vastuvõetavaid signaale detekteerida. Detektoriteks kasutati tol ajal loomulikke kristalle: galeniiti, püriiti, karborundi, kassiteriiti, vasespüriiti jt.

Konstruktivselt koosnes kristalldetektor metallkausikestest, mille sisse oli joodetud detekteeriv kristall, ja teritatud otsaga liikuvast kontaktvedrust. Säärase detektoriga töötamisel tuli alati kristallil tundlikku punkti otsida, mis oli muidugi väga ebamugav.

Elektronlampide illumisega tõrjuti kristalldetektorid kõrvale ja nad kaotasid ajutiselt oma tähtsuse. Kuid sentimeeterlainete kasutuselevõtmisega hakkasid kristalldetektorid elektronlambiga edukalt võistlema. Viimaste kasutamist nendel sagedustel piirab elektronide inerts ja lampide elektrodidevahelised mahtuvused. Ilmusid uued kristalldetektorite konstruktsioonid, mis olid vabad eelmiste puudustest ja kõlblikud ülikõrgetel sagedustel töötamiseks. Ajaliselt esimesteks olid ränidetektorid, seejärel loodi kõrgete vastupingetega germaaniumdetektorid.

Germaanium on pooljuhi omadustega keemiline element, mis kuulub Mendelejevi perioodilise süsteemi IV rühma. Tema järjekorranumber on 32 ja aatomkaal — 72,6. Oma keemiliste omaduste poolest on germaanium lähedane süsinikule ja ränile. Germaaniumil on teemanditüüpi kristallvõre. Tema sulamistäpp on  $958^{\circ}\text{C}$ , erikaal  $5,35\text{ g/cm}^3$ . Germaaniumi elektriline erijuhtivus  $\sigma$  võib muutuda suurtes piirides, ulatudes  $10^3$  kuni  $10^{-2}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ . Säärane  $\sigma$  väärtuste lai piirkond oleneb, nagu teistegi pooljuhtide korral, kristallvõresse viidud lisandite kontsentratsioonist ja tüübist. Lisandite toime germaaniumi elektrilistele omadustele on nii suur, et juba üks lisandi aatom  $10^8$  kuni  $10^9$  germaaniumi aatomi kohta suurendab elektrilist erijuhtivust. Lisaks puhtkvantitatiivsele mõjule, mis lisanditel on juhtivuse arvvaertusele, muudavad need väga hõlpsasti ka germaaniumi juhtivusmehhanismi. Seejuures esineb teatud seaduspärasus: Mendelejevi süsteemi III rühma kuuluvad lisandid (näiteks boor, alumiinium, gallium, indium, tallium) annavad germaaniumile aukjuhtivuse, kuna V rühma kuuluvad elemendid (vanaadium, antimon, vismut jt.) põhjustavad elektronjuhtivust. Kristallvõresse tähtsusetul hulgal viidud lisandi aatomitega võib saada sel viisil ettemääratud elektriliste omadustega germaaniumi. Sel asjaolul on kristalldetektorite valmistamisel esmajärguline tähtsus.

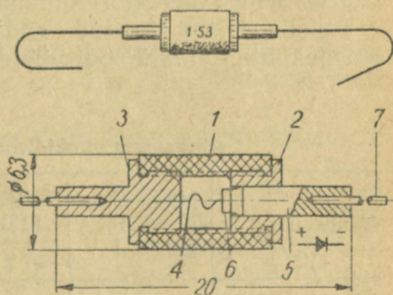
Germaaniumdetektorite tootmistehnoloogia on järgmine. Algul valmistatakse elektronjuhtivusega ja võimalikult suure eritakistusega germaaniumist kangikene. Tavali-

selt kasutatakse selleks germaaniumi, mille eritakistus on  $5 \Omega \text{ cm}$  või rohkem. Saadud kangikesest lõigatakse väike- sed tükikesed, mõõdetega umbes  $1,5 \times 0,5 \times 1,5 \text{ mm}$ . Üks säärase tükikese külgedest kaetakse õhukese metallikihi- ga. Selle küljega joodetakse germaaniumitükike hiljem diodi metallvarva külge. Metallitamine on vajalik selleks, et viia germaaniumi ja metallvarva vaheline siirdetakistus miini- mumini. Pärast jootmist germaaniumi välispind lihvitakse ja poleeritakse kuni peegelläikeni. Poleerimise kvaliteeti kontrollitakse mikroskoobi all. Pärast poleerimist pestakse varb koos tema külge joodetud kristalliga hoolikalt puh- tak. Seejärel söövitatakse poleeritud pinda teatava aja jooksul vastavas reaktiivis. Reaktiivi koostis ja söövita- mise kestus võivad olla mitmesugused. Söövitamisprotses- sis tekib elektronjuhtivusega germaaniumile aukjuhtivu- sega germaaniumist õhukene kile, mis on vajalik iga hästi alaldava süsteemi juures.

Kontaktvedru stantsitakse 50 kuni 200 mikronise läbi- mõõduga volframtraadist. Volframtraadi asemel kasuta- takse mõnikord ka fosforpronksist, molübdeenist, plaa- tinast või mõnest muust metallist traati. Väljastantsitud vedru kinnitatakse diodi teise varva külge ja kontakt- vedru vaba ots teritatakse kooniliseks.

Pärast seda operatsioo- ni pestakse kontaktvedru- ga varb hoolega puhtaks ja kuivatatakse. Järgneb diodi kokkumonteerimi- ne. Alumisele varvale ase- tatakse keraamiline pad- runikene (torukene) ja selle peale — ülemine varb. Mõlemad varvad kinnitatakse säärasel vii- sil padrunisse, et kontakt- vedru teravik satuks kris- tallile. Joonisel 16 on too- dud germaanium-punkt- diodi ДГ-Ц4 välisvaade ja lõige.

Nii valmistatud diod alaldab esialgu veel väga halvasti, kuna ta laseb läbi suuri vastuvoolusid. Alaldamisomaduste parandamiseks tuleb

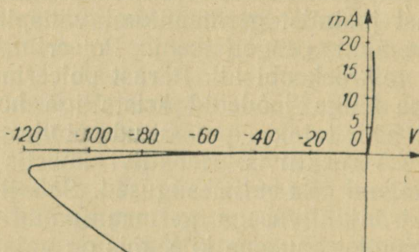


Joon. 16. Germaanium-punktdiodi ДГ-Ц4 välisvaade ja lõige.

1 — keraamiline padrun; 2 ja 3 — de- tektori ülemine ja alumine otsik; 4 — kontaktvedru; 5 — kristallhoidja; 6 — germaaniumplaadike; 7 — väljejuhtmed

läbi viia formeerimine. Selleks juhitakse avasuunas läbi detektori lühikese kestusega vooluimpulsse.

Kõikide germaaniumidiodide volt-amper-karakteristikud on mittelineaarsed (joon. 17). Karakteristikust selgub, et germaaniumdetektorite alaldamistegur on erakordselt kõrge. Madalate, 1 voldi piirides olevate pingete puhul



Joon. 17. Germaanium-punktdiodi staatiline volt-amper-karakteristik.

võib see ulatuda üle  $10^5$ . Detektoreid võrreldakse omavahel +1 V pinge puhul esineva otsevoolu suuruse alusel. Vastuvoolusid võrreldakse vastupingete juures, millede suurus oleneb detektori tüübist.

Tabelis 4 on toodud andmed mõningate kodumaiste germaanium-punktdioditüüpide kohta.

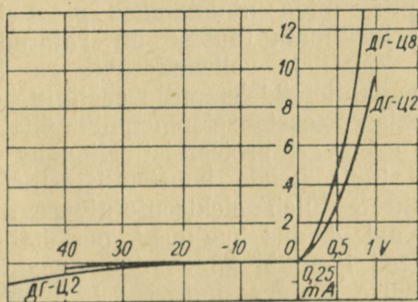
Tabel 4

Germaanium-punktdiodide põhiparameetreid

Tüübi nimetus	Minimaalne otsevool mA pingel 1 V	Maksimaalne vastuvool mA, kui vastupinge on				Maksimaalne alaldatud vool mA
		-30 V	-50 V	-75 V	-100 V	
ДГ-Ц1	2,5	—	1,0	—	—	16
ДГ-Ц2	4,0	—	0,5	—	—	16
ДГ-Ц4	2,5	—	—	0,8	—	16
ДГ-Ц5	1,0	—	—	0,25	—	16
ДГ-Ц6	2,5	—	—	—	0,8	16
ДГ-Ц7	1,0	—	—	—	0,25	16
ДГ-Ц8	10,0	0,5	—	—	—	25

Märkus: Vastupinged, millede puhul on antud maksimaalsed vastuvoolud, on vastava dioditüübi jaoks maksimaalseks vastupingeks.

Meie tööstuse poolt toodetavad germaanium-alaldusdiodid tüüp ДГ-Ц võivad töötada 150 megahertsini ulatuvas sageduste piirkonnas. Nad on varustatud pehmete väljejuhtmetega vahetult aparaatidesse jootmiseks. Joota tuleb ettevaatlikult, vähemalt 10 mm kaugusel detektori padrunist, sest detektori ülekuumutamisel võib germaaniumkristall metallvarva küljest lahti sulada ja detektor muutub kõlbmatuks. Jootmisel soovitatakse kasutada tinast ja seatinast koosnevat joodist ПOC-40.



Joon. 18. Diodide ДГ-Ц2 ja ДГ-Ц8 volt-amper-karakteristikud.

Germaaniumdiodi lülitamisel vooluringi tuleb silmas pidada tema polaarsust, mis on märgitud detektori padrunile.

Antud dioditüübile lubatud voolude ja pingete ületamine võib diodi rikkuda.

ДГ-Ц-tüüpi germaaniumdiodide eluiga on pikk ja nad võivad töötada temperatuurivahemikus  $-50$  kuni  $+70^{\circ}\text{C}$ . Välistemperatuuri tõus või langus, mis ületab toodud piirid, põhjustab detektori alaldamisvõime langust. Tugev ülekuumendamine võib selle isegi rikkuda. Diodi konstruktsioon tagab normaalset töötamist kuni 98% relatiivse niiskuse juures. Diodi kaal ei ületa 1,7 g. Joonisel 18 on toodud diodide ДГ-Ц2 ja ДГ-Ц8 volt-amper-karakteristikud.

Võrreldes lampdiodidega on kristalldiodidel järgmised paremused: võrdlemisi madalatel pingetel lineaarseks muutuv volt-amper-karakteristik, väike elektrodidevaheline mahtuvus, energiat tarbiva kütteringi puudumine.

väikesed gabariidid, suhteliselt hea mehaaniline tugevus, pikk tööiga ja suhteliselt lihtne valmistamistehnoloogia.

Võrdlemisi vähe aega tagasi on hakatud valmistama uusi germaanium-alaldusdioode, mida nimetatakse  $p-n$ -siiretega pinddiodideks (lamediodideks).

Germaanium-pinddiodide töötamis põhimõte on rajatud sellele, et ühes monoliitses germaaniumitükikeses luuakse kaks erineva juhtivusega (üks — auk- ja teine — elektronjuhtivusega) tsooni. Elektron- ja aukjuhtivusega tsoonide vahel tekib piir, mida nimetatakse  $p-n$ -siirdeks. Kõik pindalaldajad, hoolimata tüübist, on rajatud  $p-n$ -siirde kasutamisele. Tavalisi, volframteravikuga kristalldioode nimetatakse punktiodideks mitte seetõttu, et neis toimuva alaldamisprotsessi iseloom põhimõtteliselt erineks pinddiodides esinevast protsessist. Nimetus «punktiod» on tuletatud ainult nende konstruktsioonist. Selleks et saada  $p-n$ -siiret, tuleb elektronjuhtivusega germaaniumisse viia lisandeid, mis kuuluvad perioodilise süsteemi III rühma. Need lisandid annavad germaaniumile teatavasti aukjuhtivuse. Kuid seejuures ei tohi germaaniumisse viidavad lisandid tungida kogu aine paksusesse, vaid peavad ulatuma ainult teatava sügavuseni. Juhul kui lisandid tungivad germaaniumi kogu sügavusse, siis muutub see lihtsalt üleni aukjuhiks. Kui aga lisandid ulatuvad ainult teatava sügavuseni  $d$ , mis on väiksem germaaniumitüki paksusest  $l$ , siis on germaaniumil  $d$  ulatuses aukjuhtivus, ülejäänud osas aga elektronjuhtivus.

Tänapäeval valmistatakse suhteliselt võimsaid, mitut erinevat tüüpi alaldusdioode. Mõningad neist taluvad 600 volti ületavat vastupinget ja lasevad juba 1-voldise pingega juures läbi sadadesse ampritesse ulatuvat otsevoolu.

Võrreldes germaanium-punktiodidega on pinddiodidel suhteliselt suurem sisemahtvus. Seetõttu ei kasutata neid ülikõrgetel sagedustel. Pinddiodide kasutegur tõuseb 98%-ni ja nende tööiga on pikk (vähemalt 10 000 tundi).

Mõningad andmed kodumaiste pinddiodide kohta on koondatud tabelisse 5.

## Germaanium-pinddiodide põhiparameetrid

Tüübi tähis	Maksimaalne vastuvool mA, kui vastu- pinge on							Maksi- maalne alaldatud vool mA
	-50 V	-100 V	-150 V	-200 V	-300 V	-350 V	-400 V	
ДГ-Ц21	0,5	—	—	—	—	—	—	300
ДГ-Ц22	—	0,5	—	—	—	—	—	300
ДГ-Ц23	—	—	0,5	—	—	—	—	300
ДГ-Ц24	—	—	—	0,5	—	—	—	300
ДГ-Ц25	—	—	—	—	0,3	—	—	100
ДГ-Ц26	—	—	—	—	—	0,3	—	100
ДГ-Ц27	—	—	—	—	—	—	0,3	100

Märkused: 1. Vastupinge, mille puhul on antud maksimaalsed vastuvoolud, on vastava dioditüübi jaoks maksimaalseks vastupingeks.

2. Tabelis toodud alaldatud voolu maksimaalsed väärtused saavutatakse diodide ДГ-Ц21, ДГ-Ц22 ja ДГ-Ц24 juures pingel +0,5 V, ning diodide ДГ-Ц25, ДГ-Ц26, ДГ-Ц27 juures pingel +0,3 V.

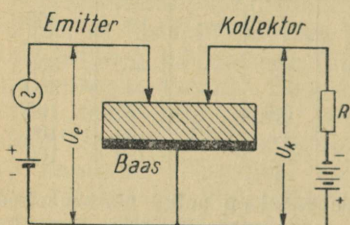
## POOLJUHTTRIOODID (TRANSISTORID)

1922. aastal avastas Nižni-Novgorodi raadiolaboratooriumi töötaja O. V. Lossev võimaluse raadiosignaalide genereerimiseks ja võimendamiseks looduslike, pooljuhtivate kristallide abil. Lossevi poolt töötati välja esimese sääraseid kristalle kasutava, «kristadüüniks» nimetatava võimendaja lülitus. Kuid tol ajal oli pooljuhtide teooria veel madalal tasemel. Kristallide lisanditest puhastamise tehnika ning lisanditesisalduse täpse määramise meetodika olid samuti vähe arenenud. Edasisi uurimusi kristallide laiema kasutamise alal pidurdasid mitme aasta jooksul ka need suured edusammud, mis tehti raadiolampide konstrueerimisel.

1948. aastal avaldati Ameerika Ühendriikides andmed esimese, punktkontaktidega kristalltriiodi kohta.

Kristall-punkttriiod koosneb tavaliselt  $n$ -tüüpi juhtivusega germaanium- või ränikristallist valmistatud õhukesest plaadikesest ja kahest metallkontaktvedrust. Viimaste teravikud puudutavad plaadikese pealmist, hästitöödeldud pinda 50 kuni 250 mikroni kaugusel teineteisest. Plaadikese alumine pind on metallitatud ja joodetud metallaluse külge.

Kristall-punkttrioodi kaks kontaktvedru ja metallalus (baas) ühendatakse lülitusse, nagu on näidatud joonisel 19. Ühele kontaktvedrudest antakse väikene positiivne potentsiaal. Seda vedru nimetatakse emitteriks, sest ta täidab elektronlambi katoodi ülesandele analoogilist funktsiooni, emiteerides (saates) auke  $n$ -tüüpi germaaniumisse. Emiteeri teraviku all tekib nn. vastastikuse mõjutamise ala, mis kujutab endast  $p$ - $n$ -siiret.



Joon. 19. Kristalltrioodiga lülituse põhimõtteskeem.

Tunduv osa emitteri juures kujunevatest «aukudest» lõmmatakse teise, kollektoriks nimetatava vedru juurde selle negatiivse potentsiaali toimel. Seega on kristalltrioodi kollektori ülesanne sama mis elektronlambi anoodilgi.

Trioodi metallalus (baas) täidab juhtelektroodi ülesannet, sest tema potentsiaalset emitteri suhtes sõltub viimase poolt emiteeritavate voolukandjate hulk.

Emiteeri vooluringi (joon. 19) juhitakse teatav muutuv signaalipinge, mida on vaja võimendada. Kollektori vooluringi ühendatakse koormustakisti  $R$ , mille klemmidelt võetakse võimendatud vahelduvpinge. Kuna emitteri alalispingele lisandub signaali vahelduvpinge, siis hakkab sünkroonselt emitteri potentsiaali muutumisega muutuma ka vool tema vooluringis. Voolu muutumine emitteri ahelas põhjustab tunduvat voolu muutumist kollektori ahelas.

Kollektorvoolu muutumise suhet teda põhjustava emittervoolu muutumisse antud emitterpinge juures nimetatakse trioodi vooluvõimendusteguriks  $a$ .

Punkttrioodide vooluvõimendustegur on staatilisel režiimil tavaliselt 2—2,5.

Käsitleme kristalltrioodides tekkiva võimenduse füüsikalist olemust. Elektronjuhtivusega germaaniumi iga punkt, mida kontaktvedrud vahetult puudutavad, omab kõrge vastupingega detektorile vastavat volt-amper-karakteristikut. Teiste sõnadega, igas säärases punktis esineb  $p$ - $n$ -siire, mida põhjustab asjaolu, et  $n$ -germaaniumi pinnale on erilise töötlemisega loodud õhukene  $p$ -germaaniumi kiht. Kui anda emitterile avasuunas üksik pinge-

impulss, siis tungivad augud selle pingeimpulsi elektri-  
välja toimetel  $p$ -germaaniumist  $n$ -germaaniumisse. Seda  
nähtust nimetatakse erikirjanduses voolukandjate «injek-  
teerimiseks» ehk «sissepritsimiseks».  $n$ -germaaniumisse  
injekteeritud augud rändavad selle ruumalal vabalt ringi  
teatava, väga lühikese ajavahemiku jooksul, mida võib hin-  
nata mõnele tuhandikule sekundile. Selle «eluea» jooksul  
jõuavad mittepõhilised voolukandjad (augud) elektronger-  
maaniumis liikuda kollektorvälja toimetel kollektori  
 $p$ — $n$ -siirde tsooni, mille tulemuseks on selle juhtivuse tun-  
dud suurenemine. Kui enne pingeimpulssi oli  $p$ — $n$ -siirde  
takistus tõkkesuunas kõrge, siis pärast emitteri poolt injek-  
teeritud aukude tungimist nimetatud tsooni langeb siir-  
detakistus järsult. Selle tagajärjel jaotub kollektori  
vooluringi ühendatud patarei pinge kristalltrioodi  
ja koormustakisti vahel nii ümber, et suurem osa  
temast langeb koormustakistile ja kasutatakse ära välje-  
pingena.

Nähted, mis emitterile üksiku pingeimpulsi andmisel  
kristalltrioodis aset leiavad, põhjustavad signaali võimen-  
damist nii voolu, pinge kui ka võimsuse osas. On endast-  
mõistetav, et nende protsesside iseloom ei muutu ka sel  
juhul, kui emitterile antakse mitte üks, vaid mitu ükstei-  
sele järgnevat impulssi, või koguni vahelduvat, siinuselist  
pinget. Lisaks võimendatavatele signaalidele tuleb viima-  
sel juhul emitterile anda veel püsiv eelpinge.

Kristalltrioodi üheks põhiliseks omaduseks on tema väike  
sisend- ja suhteliselt suur väljetakistus. See on tingitud  
asjaolust, et emitter ühendatakse lülitusse avasuunas, kol-  
lektor aga tõkkesuunas.

Trioodi sisendtakistuseks on takistus emitteri ja juht-  
elektroodi (baasi) kontaktide vahel, kui väljevooluring on  
avatud. Seda takistust tähistatakse  $R_{11}$  ja ta määra-  
takse emitterpinge muutuse ja selle poolt põhjustatud  
emittervoolu muutuse suhtest püsiva kollektorvoolu  
puhul.

Trioodi väljetakistuseks on takistus kollektori ja juht-  
elektroodi kontaktide vahel, kui emitteri vooluring on ava-  
tud. Analoogiliselt sisendtakistuse määramisega leitakse  
väljetakistus kollektorpinge ja kollektorvoolu muutuse  
suhtest konstantse emitterpinge puhul. Seda takistust tähis-  
tatakse  $R_{22}$ .

Punktkontaktidega trioodides kasutatakse peamiselt

$n$ -tüüpi juhtivusega germaaniumi, sest see tagab vooluvõimendusteguri suuri väärtusi. Kuid  $p$ -germaaniumi kasutamisel saadakse umbes kaks korda kõrgemaid töösagedusi, sest laengut kandvate elektronide liikuvus on aukude liikuvusest umbes 2 korda suurem ( $3\,600\text{ cm}^2/\text{Vsec}$   $1\,700\text{ cm}^2/\text{Vsec}$  asemel). On kindlaks tehtud, et punkttrioidid võivad töötada kuni 10 megahertsilistel sagedustel.

Kristalltrioidide konstruktsiooni edasise arengu tulemusel ilmusid 1950. aastal nn. pindtrioidid. Analoogiliselt pindtrioididele kasutatakse nendes sääraseid germaaniumi monokristalle, milledes juhtivuse iseloom antud piirkonnas järsult muutub. Kõige laialdasemalt on kasutusel trioidid, kus juhtivuse muutus on  $p$ - $n$ - $p$ -tüüpi. Tuntud on ka  $n$ - $p$ - $n$ -tüüpi germaaniumtrioidid. Mõlemat tüüpi trioidide üheaegne kasutamine on väga mugav sümmeetrilistes, eriti just kahetakilistes lülitustes, kus nimetatud trioiditüüpide mitmesugused kombinatsioonid võimaldavad läbi saada ilma transformaatoriteta.

Kuigi pindtrioidil on kolm erineva juhtivusega tsooni ( $n$ - $p$ - $n$  või  $p$ - $n$ - $p$ ), on viimased seotud ühtse kristallvõrega. Iga niisuguse tsooniga on ühendatud suhteliselt suure pindalaga kontaktid. Keskmise,  $p$ -tüüpi ( $n$ - $p$ - $n$ -trioidis) või  $n$ -tüüpi ( $p$ - $n$ - $p$ -trioidis) tsoon täidab juhtelektroodi (baasi) ülesannet. Ülejäänud kaks tsooni on vastavalt emitteriks ja kollektoriks.

Kristallpindtrioididel on rida olulisi eeliseid, kuigi nad oma töötamis põhimõttelt punkttrioididest vähe erinevad. Tänu punktkontaktide puudumisele on pindtrioididel suur mehaaniline tugevus, pikk tööiga (mitukümmend tuhat tundi) ja tunduvalt väiksem omamüra.

Lisaks sellele võimaldavad suured kontaktpinnad saavutada ka palju suuremaid väljevõimsusi. Juba käesoleval ajal tuntakse kristalltrioidi väljevõimusega kuni 100 W.

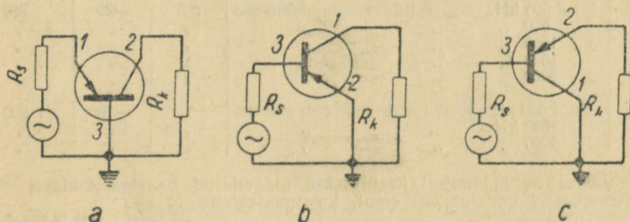
Kristalltrioidi võib kasutada kolmes lülitusviisis: maandatud baasiga, maandatud emitteriga ja lõpuks — maandatud kollektoriga (joon. 20).

Punkttrioidi saab samal ajal kasutada ainult maandatud baasiga, kuna nad teistes lülitustes töötavad ebaõnnestunult.

Andmed mõningate kodumaiste punkt- ja pindtrioidide

kohta on toodud tabelis 6, kus on kasutatud alljärgnevaid tähiseid:

$I_e$  — emittervool;  $I_k$  — kollektorvool;  $U_k$  — kollektorpinge;  $R_{11}$  — trioodi sisendtakistus (definiitsioon on antud eespool);  $R_{12}$  — tagasisidetakistus avatud sisendringi puhul (baasi takistus), mis määratakse emitterpinge muutuse ja seda põhjustanud kollektorvoolu muutuse suhtest konstantse emittervoolu puhul;  $R_{22}$  — trioodi väljetakistus



Joon. 20. Kristalltrioodide põhilised lülitusviisid.

*a* — maandatud baasiga; *b* — maandatud emitteriga; *c* — maandatud kollektoriga.

(definiitsioon on antud eespool);  $\alpha_I$  — vooluvõimendustegur (definiitsioon on antud eespool);  $\alpha_{I,n}$  — vooluvõimendustegur kõrgeimal töösagedusel;  $\alpha_P$  — võimsusevõimendustegur, mis on määratud trioodiga ühendatud koormustakistuses eralduva vahelduvvõimsuse ( $U_v^2/R_k$ ) ja siseneva signaali allika kasuliku võimsuse ( $U_s^2/4R_s$ ) suhtest;  $U_v$  tähistab seejuures väljepingi vahelduvkomponenti,  $R_k$  — koormustakistust,  $U_s$  — siseneva signaali allika elektromootorset jõudu,  $R_s$  — siseneva signaali allika sisetakistust;  $\alpha_U$  — pingevõimendustegur;  $P_k$  — maksimaalne kollektori kaovõimsus;  $R_e$  — emitteri takistus, mis määratakse emitteri ja baasi vahelise pinge muutuse ning seda põhjustanud kollektorvoolu muutuse suhtest konstantse baasivoolu puhul;  $R_{koll}$  — kollektori takistus, mis määratakse kollektori ja baasi vahelise pinge muutuse ning seda põhjustanud kollektorvoolu muutuse suhtest konstantse baasivoolu puhul;  $N_m$  — mürategur;  $P_v$  — väljevõimsus;  $K_I$  — mitte-lineaarsete moonutuste tegur;  $C_k$  — kollektori mahtuvus, s. t. kollektori tõkkekihi mahtuvus.

1. Punkttrioodid tüüp C1 ja C2

Alltüüp	Kasutusala	Möödetud tingimustel		Parameetrid <sup>1</sup>					Maksimaalselt lubatavad väärtused					
		$I_e$ mA	$U_k$ V	$R_{11}$ Ω (maks.)	$R_{12}$ Ω (maks.)	$R_{22}$ kΩ (min.)	$\alpha_I$ (min.)	$\alpha_{Ifm}$ (min.)	$\alpha_p^2$ db	$\alpha_U$	$I_e$ mA	$I_k$ mA	$U_k$ V	$P_k$ mW
C1A	Kuni 500 kHz signaalide võimendamiseks	0,3	-20	750	200	7	1,2	1,0	15-19	-	10	10	-40	100
C1B	" 500 "	"	"	"	"	"	1,5	1,2	18-22	-	6	6	"	50
C1C	" 1500 "	"	"	"	"	"	"	"	15-19	-	10	10	"	100
C1Г	" 1500 "	"	"	"	"	"	"	"	18-22	-	6	6	"	50
C1D	" 5000 "	"	"	"	"	"	"	"	15-22	30	"	"	"	"
C2A	Kuni 500 kHz võnkumiste genereerimiseks	"	-10	1 500	1 000	"	"	"	-	-	"	10	-30	100
C2B	" 1500 kHz "	"	"	"	700	"	1,6	1,5	-	-	"	6	-20	50
C2B	" 5000 kHz "	"	"	"	1 000	"	"	"	-	-	"	"	"	"

<sup>1</sup> Parameetrite mõõtmisel kasutatakse maandatud baasiga A-klassi lülitust ja sagedust mitte üle 20 kHz; temperatuur  $+20 \pm 5^\circ C$ .  
<sup>2</sup> Generaatori takistus 500 oomi, koormustakistus 10 kΩ.

2. Pindtrioodid tüüp П1 ja П2 (p-n-p)

Alltüüp	Kasutusala	Möödetud tingimustel			Parameetrid <sup>2</sup>					Maksimaalselt lubatavad väärtused								
		$I_e^1$ mA	$I_k^1$ mA	$U_k^1$ V	$R_e$ Ω	$R_{koll}$ MΩ	$R_{baas}$ Ω (maks.)	$\alpha_I^3$	$\alpha_{Ifm}$ (min.)	$\alpha_p^4$ db (min.)	$N_m^4$ db (maks.)	$P_v^5$ mW (min.)	$K_f^5$ % (maks.)	$C_k$ pF (maks.)	$I_e^1$ mA	$I_k^1$ mA	$U_k^1$ V	$P_k$ mW
П1A	Signaalide võimendamiseks kuni 100 kHz	1,0	-	-10	30	min. 0,3	-	min. 0,9	0,7	30	-	-	-	-	5	5	-20	50
П1Б	" 100 "	"	"	"	"	0,5-1,2	"	0,93-0,97	"	33	35	-	-	-	-	-	"	"
П1В	" 100 "	"	"	"	"	min. 1,0	"	"	"	37	35	-	-	-	-	-	"	"
П1Г	" 100 "	"	"	"	"	0,5	"	min. 0,96	"	37	-	-	-	-	-	-	"	"
П1Д	" 100 "	"	"	"	"	0,5	"	0,94	"	33	18	-	-	-	-	-	"	"
П1E	" 465 "	"	"	"	"	0,3	"	0,94-1,0	"	30	35	-	-	60	-	-	"	"
П2	Helisageduslike signaalide võimendamiseks	-	-5	-50	-	-	-	min. 0,85	-	17	-	100	15	-	10	10	-100	250

<sup>1</sup> Voolu positiivseks suunaks on võetud suund emitterist ja kollektorist baasi poole. Pinged mõõdetakse baasi suhtes.

<sup>2</sup> Parameetrid mõõdetakse temperatuuril  $+20 \pm 5^\circ C$ .

<sup>3</sup>  $\alpha_I$  mõõtmisel kasutatakse maandatud baasiga A-klassi lülitust ja sagedust 1000 Hz; välje lühistatakse.

<sup>4</sup>  $\alpha_p$  ja  $N_m$  mõõtmisel kasutatakse maandatud emitteriga A-klassi lülitust ja sagedust 1000 Hz; generaatori takistus 600 oomi, koormustakistus 30 kΩ.

<sup>5</sup>  $P_v$  ja  $K_f$  mõõtmisel kasutatakse lülitust maandatud baasiga ja sagedust 400 Hz; generaatori takistus 100 oomi, koormustakistus 10 kΩ.

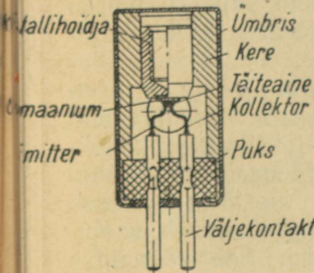
Eksploatatsioonieeskirjadest:

Ümbritseva keskkonna maksimaalselt lubatav temperatuur  $+50^\circ C$ .

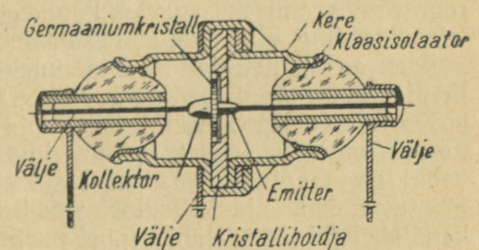
Trioodi külgeühendamisel tuleb baasi kontakt ühendada esimesena.

Trioodid ei tohi paikneda lülituse kuumenevate elementide läheduses. Osoovitav luua head tingimused soojuse ära vooluks trioodi kerelt.

Väljejuhtmete juotmine ja painutamine trioodi kerest vähem kui 10 mm kaugusel on keelatud. Juotmisel kasutada joodist sulamistemperatuuriga mitte üle  $150^\circ C$ .



Punkttrioodi lõige.



Pindtrioodi lõige.

Kaasaegsete kristalltriöödide tõsisteks puudusteks on nende parameetrite suur hajuvus, suhteliselt madalad töösagedused, kõrge omamürade nivoo ja ebastabiilne töötamine 70° C ületavate välistemperatuuride puhul.

Kuid kristalltriöödide suured põhimõttelised eelised (suur ökonoomsus ja kasutus-iga, kerge kaal ja väikesed gabariidid ning suur mehaaniline tugevus) stimuleerivad kõikides maades uurimistöid, millede eesmärgiks on kristalltriöödide parameetrite edasine parandamine. Viimaste aastate jooksul on sel alal tehtud uusi tõsiseid edusamme.

Näiteks rea tehnoloogiliste täiustuste ja ühtlasemate materjalide saamise tagajärjel töötavad mõningad germaaniumtriöödide tüübid stabiilselt juba välistemperatuuril 85° C. 1953. aastal valmistati kristall-pindtetrood, mille töösageduse piirväärtuseks on 20 MHz.

1954. aastal ilmusid tehnilises ajakirjanduses andmed uut tüüpi germaaniumtriöödi — nn. pindbarjääridega triöödi — kohta. Selles triöödis on töösageduse tõstmise eesmärgil germaaniumplaadi vastaskülgedesse elektrolüütilisel teel söövitatud kaks süvendit, nii et järele jääb ainult õhuke, 0,005 mm paksune germaaniumikiht. Seejärel kantakse süvendite põhja samuti elektrolüütiliselt õhukene kiht indiumi, millega saavutatakse kristalli mõlemal poolel *p-n*-siire. Need kristalltriöödid võivad töötada 60—100 MHz-ni ulatuvatel töösagedustel ja nad on punkttriöödist 10—20 korda ökonoomsemad.

On samuti kindlaks tehtud, et räni kasutamine germaaniumi asemel võimaldab mitte ainult tõsta töösagedusi, vaid võimaldab ka kristalltriöödide termilist stabiilsust järsult suurendada.

Käesoleval ajal tuntakse räni triööditüüpe, mis töötavad isegi temperatuuril 150—175° C. Sellega seoses töötatakse praegu mitmetes maades välja meetodeid vajaliku puhtusega räni saamiseks suurtes kogustes ja arendatakse räni triöödide ning *-diodide* konstruktsioone.

1954. aastal avaldati veel andmeid *p-n-i-p-* ja *n-p-i-n*-tüüpi kristall-pindtriöödide kohta. Säärases triöödis paikneb *n*-juhtivusega aluskihi (baasi) ja *p*-juhtivusega kollektorkihi vahel kiht hästi rafineeritud (peaaegu lisanditevaba) germaaniumi, mis on isejuhtiv. Seetõttu väheneb mahtuvus baasi ja kollektori vahel ning suureneb voolukandjate liikuvus läbi selle piirkonna. See võimaldas triöödi töösagedust umbes kümnekordseks tõsta. 50 mik-

roni paksuse vahekihiiga (viimast tähistatakse tähega *i*) valmistatud trioodid töötavad sagedusel 95 MHz. Teoreetilistel kaalutlustel eeldatakse, et seda tüüpi trioodid võivad genereerida 3 000 MHz-ni ulatuvaid sagedusi ja 1 000 MHz sagedusel omada võimendust kuni 10 db.

## POOLJUHTSEADISTE KASUTAMISEST

Pooljuhtalaldajad on tuntud juba võrdlemisi ammu ja nad on võitnud üldise tunnustuse tänu säärasele eelisele, nagu kõrge kasutegur (75%) suhteliselt madalate pingete korral, konstruktsiooni lihtsus, töökindlus, ökonoomsus jne.

Laialdast rakendamist on leidnud seleenalaldajad. Neid kasutatakse side- ja raudtee-autoblokeerimisseadmete toitmiseks, akumulaatorite laadimiseks, sadadesse ja tuhandesse ampritesse ulatuva voolutarvitusega elektrolüüsivannide toitmiseks jne. Pooljuhtdiodid (räni- ja germaaniumdiodid) on tänapäevani jäänud põhilisteks detektor- ja segustusseadiste tüüpideks sentimeeterlainete piirkonnas. Pooljuhtidest punkt- ja pinddiodide kasutatakse edukalt kõrge- ja madalsagedusvoolude diskriminaatoritena ja alaldajatena.

Germaaniumdiodide kasutamine trükitud skeemide tehnikas võimaldas aparaatide gabariite suuresti vähendada. Kristalltrioodide kasutuselevõtt andis võimaluse aparatuuri edasiseks lihtsustamiseks ja tõstis selle töökindlust. Käesoleval ajal leiavad germaaniumtrioodid üha laialdasemat rakendamist kantavates raadio «taskuvastuvõtjates», kõva kuulmisega isikutele määratud kuuldeaparatuuride võimendajates jne.

Elektronlampidega autoraadioaparatuuride toitmiseks kasutatakse vibraatormuundajaid, mis muundavad alalisvoolu vahelduvvooluks, ja alaldajaid. Vibraatormuundajate tööiga on lühikene — mõnisada tundi — ja nende maksumus kõrge. Pooljuhttrioodide võime töötada madalatel pingetel ja edusammud võimsustrioodide loomisel, millede võimsus ulatub mitme vatini, võimaldasid esmakordselt konstrueerida autoraadiovastuvõtjaid toitega otse akupatareist.

Kristalltrioodide kasutamine traat-telefonisides avab selle ees uued perspektiivid, võimaldades selle kvaliteedinäitajaid tõsiselt parandada. Elektronlampide kasutamine

ei ole siin alati otstarbekas nende piiratud eluea tõttu ja vajadusest mitmesuguste vooluallikate järele.

Kristalltrioodide rakendamisel on väga suured perspektiivid kaabel-sideliinides, eriti veealustes kaabelliinides, kus tuleb kasutada hooldamist mittevajavaid võimendajaid.

Kristallvõimendajad ja generaatorseadmed on praegu alles oma arengu algastmel. Kuid juba nüüd on välja töötatud ja eksperimentaalselt kontrollitud suur hulk mitmesuguste seadmete, nagu madalsagedus-, vahesagedus-, alalisvoolu- ja viideovõimendajate, siinuseliste võngete generaatorite, blokeerivate generaatorite, multivibraatorite jne. lülitusi. Käesoleval ajal toodetakse juba tööstuslikult kristallsüsteemiga ringhäälingu-vastuvõtjaid, samuti on valmistatud esimesed eksperimentaalsed televiisorid.

Pole kahtlust, et pooljuhtide tehnika edasine areng toob endaga kaasa revolutsiooni elektronseadmete konstrueerimises ja tootmistehnoloogias ning soodustab nende üha laialdasemat juurutamist kõigisse rahvamajandusharudesse.

## KOLMAS PEATÜKK

### FOTOTAKISTID

#### SELEEN-FOTOTAKISTID

Sisefotoefekt avastati 1873. aastal ja kaks aastat hiljem valmistati esimene fototakisti.

Pooljuht-fototakisteid nimetatakse mõnikord mitte päris sobivalt fotoelementideks. Pooljuhttakistis kutsub neeldunud kiirgus esile aine elektrilise eritakistuse muutumise, põhjustamata fotoelektrilist voolu või elektromotoorset jõudu, nagu see esineb tõkkekihiga fotoelementides.

Välisfotoefektiga fotoelemendi ja fototakisti vahel esineb samuti põhimõtteline erinevus. Vaakuum- või gaastäitega fotoelemendis saab vool kulgeda ainult ühes suunas. Fototakistil puudub see iseloomulik joon: ta juhib elektrit mõlemas suunas ühesuguselt. Nagu juba eelmises peatükis näidati, kulutatakse sisefotoefekti puhul neeldunud valgusenergia mitte teatava hulga elektronide ainest väljakiskumiseks, vaid nende vabastamiseks aine enese massis, s. t. nende üleviimiseks juhtivustsooni. Fotoelektronide tekki-

mise tõttu väheneb tunduvalt selle pooljuhi elektriline eritakistus, millest fototakisti on valmistatud. Siin ei ilmne kiirgusenergia vahetult, vaid jääb peidetud olekusse, nagu konserveerudes fototakisti materjalsse. Fototakisti on seega kokkuvõttes pooljuhtseadis, mis muudab valguse toimel oma elektrilist takistust.

Sisefotoefekti füüsikalise olemuse eelnenud käsitusest selgub fototakisti põhimõtteline ehitus. Fototakisti kujutab endast plaadikest (enamikul juhtudest õhukest pooljuhikihti), mille äärtele on kinnitatud kindlat elektrilist kontakti tagavad metallektroodid. Säärane fototakisti lülitakse vooluallikaga järjestikku.

Kui fototakisti on pimendatud, siis voolab kogu vooluringis, järelikult ka fototakistis endas, vool, mille tugevus määratakse fototakisti oomilise takistusega ja temale rakendatud pingega. Niisugust voolu nimetatakse pimevooluks. Fototakisti valgustamisel vool vooluringis tugevneb, kusjuures tugevnemine on seda suurem, mida tugevam on valgusvoog. Pooljuhi valgustamisel esineva voolu ja pimevoolu vahe annabki fotovoolu väärtuse.

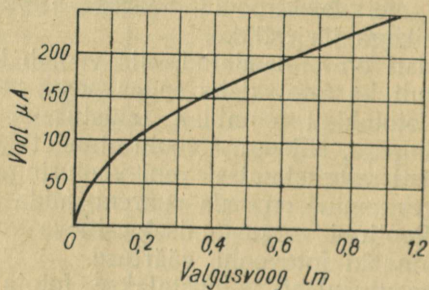
Olenevalt kasutusalaast valmistatakse fototakisteid mitmesugustest pooljuhtivatest materjalidest. Fototakistite tundlikkus on välisfotoefektiga vaakuum-fotoelementide tundlikkusest tunduvalt suurem. See tähendab, et ühesuguse valgustustiheduse korral tagab fototakisti mitu korda suurema voolu tugevnemise kui välisfotoefektiga fotoelement. Enamiku fototakistite oluliseks puuduseks on nende suur inerts, samal ajal kui välisfotoefektiga vaakuum-fotoelement on praktiliselt inertsivaba.

Fototakistite teiseks oluliseks puuduseks on fotovoolu mittelineaarne sõltuvus valgusvoo intensiivsusest. Joonisel 21 on toodud kõver, mis näitab mikroamprites ( $\mu\text{A}$ ) mõõdetud fotovoolu sõltuvust luumenites ( $\text{lm}$ ) avaldatud valgusvoost.

Kuigi mõlemad ülalkäsitletud puudused on väga olulised, ei takista nad ometi fototakistite levikut mitmes tehnikaharus. Lisaks sellele otsitakse praegu uusi pooljuhtivaid materjale, mis oleksid neist puudusist suurel määral vabad ning konstrueeritakse uusi, paremate tunnussuurustega fototakistite tüüpe. Päril hiljuti õnnestus füüsikutel lahendada rida raskusi ja saada märksa paremate omadustega fototakisteid.

Fototakisti spektraalse tundlikkuse karakteristik ja integ-

raalne tundlikkus sõltuvad materjalist, mida kasutati fototakisti valmistamisel. Fotoelemendi või fototakisti integraalse tundlikkuse all mõistetakse fotovoolu tugevust, mis tekib vooluringis juhul, kui fotoelemendile langeb valgusvoo ühikule vastav kiirgusenergia. Viimane peab koosnema mitmesuguse pikkusega lainetest ja oma spektraalselt koostiselt vastama kiirgusele, mida annab temperatuurini  $2840^{\circ}\text{K}$  kuumutatud volframhõõgniidiga lamp. Nähtava valguse valgusvoo ühikuks on lumen. Seega mõõ-



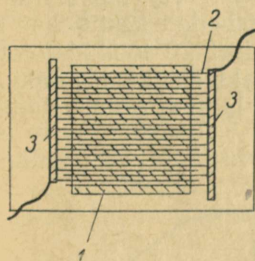
Joon. 21. Fototakisti lumen-amper-karakteristik.

detakse spektri nähtavas osas fotoelemendi integraalset tundlikkust mikroamprites lumeni kohta ( $\mu\text{A}/\text{lm}$ ). Spektraalset tundlikkust iseloomustab fotovool, mis tekib monokromaatilise kiirgusenergia ühikvoo toimel. Järelikult, kui fotoelemendi integraalset tundlikkust saab avaldada ühe arvuga — fotovoolu suurusega kiirgusenergia ühikvoo kohta, siis fotoelemendi spektraalne tundlikkus antakse tavaliselt graafiku kujul. Graafiku vertikaalteljele kantakse kas fotovoolu tugevus või fotoelemendi tundlikkus ja horisontaalteljele — lainepikkused teatavates ühikutes, näiteks ongströmides ( $\text{\AA}$ ).

Ajalooliselt esimene fototakisti, mis etendas teaduses ja tehnikas väga tähtsat osa, valmistati seleenist. Seleenifototakistite valmistamise tehnoloogia on välja töötatud ja täiustatud aastate jooksul.

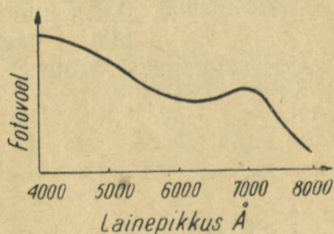
Fototakistite üks kaasaegsetest valmistamisviisidest on järgmine. Isoleerivast materjalist (näiteks klaasist) plaadikesele kantakse õhukene seleenikiht. Tavaliselt toimub see vaakuumis aurustamise teel. Kogu protsess toimub

eriseadmes klaaskupli all või klaaskolvis, kus pumpade abil on loodud  $10^{-5}$  mm elavhõbedasambale vastav hõrendus. Klaaskupli alla on asetatud seleeniga täidetud metallkünake, mille külge ühendatakse väljejuhtmed. Künakese kohale asetatakse katmisele tulevad klaasplaadid. Seejärel ühendatakse väljejuhtmed vooluallikaga. Seleeniga täidetud metallkünake kuumeneb voolu toimel temperatuurini, mille juures seleen hakkab auruma. Need aurud kondenseeruvad künakese kohale ülesriputatud plaadikestel. Aurustamise kestust sobivalt valides võib plaatidele moodustada igas



Joon. 22. Seleen-fototakisti konstruktsioon.

1 — seleen; 2 — elektroodid klaasalusel; 3 — väljejuhtmed.



Joon. 23. Seleen-fototakisti spektraalse tundlikkuse karakteristik.

soovitavas, etteantud paksuses kihi. Fototakistite puhul osutub sobivaks kihipaksuseks 20—30 mikronit. Enne seleeni aurustamist kantakse klaasplaadikestele mitu ribakujulist elektroodi, nagu näidatud joonisel 22. Üks osa elektroodidest ühendatakse parempoolse, teine — vasakpoolse väljejuhtmega.

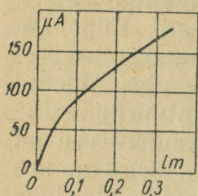
Kuna seleen õhu käes olles aja jooksul hapendub, mis kihi fotoelektrilistele omadustele mõjuks negatiivselt, siis kaetakse seleenikihi pind läbipaistvast lakist kaitsekilega.

Seleen-fototakisti spektraalset tundlikkust kujutab joonis 23.

Joonisel 24 on näidatud seleen-fototakisti integraalse tundlikkuse karakteristik, s. o. fotovoolum sõltuvus valgusvoost. See karakteristik, mis on üles võetud teatava kindla pinge juures, kulgeb mittelineaarselt.

Seleen-fototakistite pimetakistused on erinevad, kõikudes  $10^4$  kuni  $10^8 \Omega$  piirides. Nende integraalne tundlikkus on,

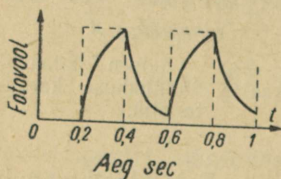
olevalt lähtetingimustest, samuti erinev, alates 100 ja ulatudes kuni 3 000  $\mu\text{A}/\text{lm}$ .



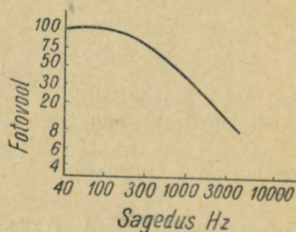
Joon. 24. Seleen-fototakisti luumen-  
amper-karakteristik.

Seleen-fototakistite inertsus on väga suur, mistõttu neid ei saa kasutada näiteks helikinos. Joonisel 25 on täisjoonega toodud kõver, mis näitab ilmekalt seleen-fototakisti inertsust. Kõver on saadud olukorras, kus fototakistile juhiti lühikese kestusega valgusimpulsi (viimased on joonisel näidatud kriipsjoonega). Nii valgusimpulsside kui ka nende vahede kestuseks oli 0,2 sekundit. Joonisel 26 toodud fototakisti sageduskarakteristikust nähtub,

et alates sagedusest umbes 200 Hz langeb fotovool järsult.



Joon. 25. Seleen-fototakisti inertsus.



Joon. 26. Seleen-fototakisti sageduskarakteristik.

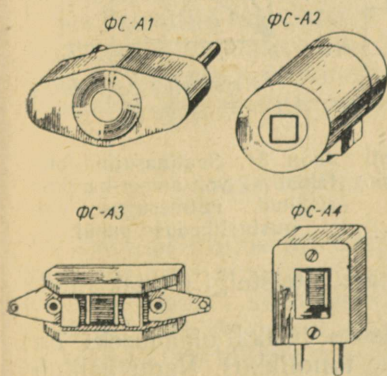
## TALLOFIIDID

Omala ajal olid suurteks huviobjektideks talliumsulfiid-fototakistid. Nagu joonisel 27 nähtub, paikneb talliumsulfiid-fototakistite spektraalse tundlikkuse maksimum spektri infrapunases osas (umbes 8 000 Å piirkonnas). Seega osutuvad tallofiidid pikalainelise valguskiirguse headeks vastuvõtjateks. Tuleb märkida, et veel praegugi jätkatakse mõningatel juhtudel tallofiidide kasutamist, kuid uute fototakistitüüpide ilmumisega väheneb nende tähtsus pidevalt.

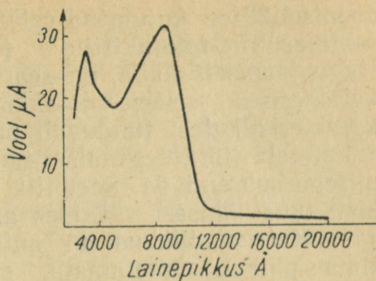
## SEATINASULFIID- FOTOTAKISTID

Seatinasulfiidist (PbS) valmistatavate fototakistite leiutamist tuleb kahtlemata lugeda suureks edusammuks. Meie tööstus toodab neid markide  $\Phi$ C-A1,  $\Phi$ C-A2;  $\Phi$ C-A3 ja  $\Phi$ C-A4 all. Nimetatud fototakistitüüpide loomine Nõukogude Liidus on B. T. Kolomiitsi teeneks.

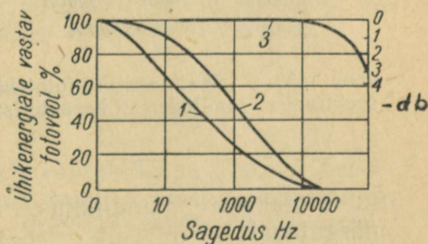
Seatinasulfiid-fototakistiteid saab valmistada mitmesugusel viisil. Õhukesi PbS-kihte võib muuhulgas saada seatinasulfiidi aurustamisel vaakumis ja sadestamisel mõnele isoleerivale klaasile, vilgukivist või keraamilisele alusele. Nii valmistatud pooljuhtivale kihile kinnitatakse



Joon. 28. Seatinasulfiid-fototakistite väliskujud.



Joon. 27. Tallofiidi spektraalse tundlikkuse karakteristik.



Joon. 29. Fototakistite võrdlevad sageduskarakteristikud.

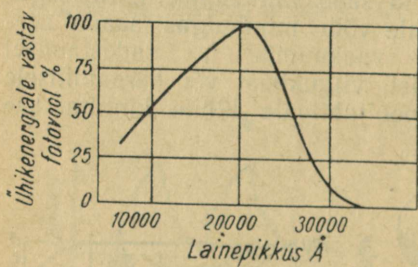
1 — seelen-fototakisti; 2 — talliumsulfiid-fototakisti; 3 — seatinasulfiid-fototakisti.

elektroodid ja kogu süsteem asetatakse padrunisse. Joonisel 28 on kujutatud fototakistid  $\Phi$ C-A1,  $\Phi$ C-A2,  $\Phi$ C-A3 ja  $\Phi$ C-A4.

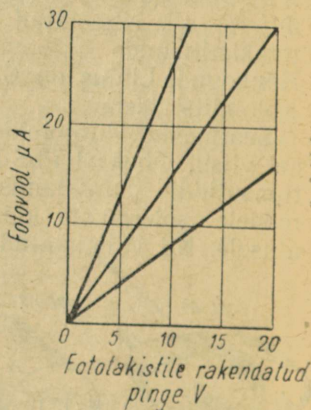
Seatinasulfiidist valmistatud fototakistite peamiseks ja väga suureks eeliseks on see, et nende inertsus on seelen-fototakistite ja tallofiididega võrreldes tunduvalt väiksem.

Joonisel 29 on kujutatud seleen- (1), talliumsulfiid- (2) ja seatinasulfiid-fototakistite (3) sageduskarakteristikud. Nagu jooniselt näha, on seatinasulfiid-fototakisti sageduskarakteristik seleen-fototakisti ja tallofiidi vastavatest karakteristikutest tunduvalt parem.

Fototakistite integraalset tundlikkust võib tööpinge tõstmisega suurendada. Seetõttu tuleb selle või teise fototakisti tundlikkusest rääkides arvesse võtta rakendatud pinget. Kui tundlikkus on antud ilma pinget nimetamata, siis tuleb selleks võtta antud tüüpi fototakisti puhul soovitatav normaalne tööpinge. Temperatuuri langemisel kasvab seatinasul-



Joon. 30. Seatinasulfiid-fototakisti spektraalse tundlikkuse karakteristik.



Joon. 31. Seatinasulfiid-fototakisti volt-amper-karakteristikud mitmesuguse valgustustiheduse puhul.

fiid-fototakistite tundlikkus, nagu teistelgi fototakistitel, märgatavalt.

Seatinasulfiid-fototakistite teiseks heaks omaduseks on nende suhteliselt lai spektraalne tundlikkus. Nagu nähtub jooniselt 30, asub spektraalse tundlikkuse maksimum spektri infrapunases osas, 21 000 Å piires. Mis puutub seatinasulfiid-fototakistite sisetakistusse, siis kõigub see suurtes piirides (kümnetest tuhandetest oomidest kuni mõne megaoomini). Spektraalse tundlikkuse iseloom aga on pooljuhtiva kihi ühesuguse paksuse puhul alati ühesugune. Pooljuhtiva kihi õhenemisel nihkub tundlikkuse maksimum veidi lühemate lainepikkuste suunas ja, vastupidi, pooljuhtiva kihi paksenemisega kaasub nimetatud maksimumi nihkumine suuremate lainepikkuste poole.

Seatinasulfiid-fototakistite fotovool on proportsionaalne rakendatud pingega. Joonisel 31 on toodud kolm volt-amper-karakteristikut, mis on saadud fototakisti pinna erinevate valgustustiheduse puhul.

Seatinasulfiid-fototakistite fotovoolu ja valgustustiheduse vahel ei ole kahjuks lineaarset sõltuvust. Viimase iseloom osutub palju keerukamaks.

ΦC-A-tüüpi fototakisteid ei soovitata kasutada suurendatud niiskuse tingimustes. Lisaks sellele tuleb silmas pidada, et fototakistile kõrgendatud pinge rakendamine võib põhjustada takisti riknemist. Seepärast peab fototakisti ΦC-A iga üksiku eksemplari juures silmas pidama soovitatavat tööpinget, mis on märgitud takistiga kaasantavasse passi. Näitena võib ära märkida, et fototakistile ΦC-A1 rakendatakse pinge, mille puhul pimevool võrdub 100  $\mu$ A-ga (s. o. umbes 15 V). ΦC-A-tüüpi fototakistid ei karda «ülevalgustamist», s. t. võimsat ja eredat valgust, mis teistel fototakistitel põhjustab jäävat tundlikkuse kaotust. Normaalses ekspluatatsioonitingimustes on seatinasulfiid-fototakistite kasutus-iga praktiliselt piiramata.

Seatinasulfiid-fototakistite suur tundlikkus, väikesed tööpinged, suhteliselt väike inertsus ja nende ekspluatatsiooniseaduste lihtsus ning töökindlus annavad aluse väiteks, et nimetatud fototakistite praktiline kasutusala laieneb.

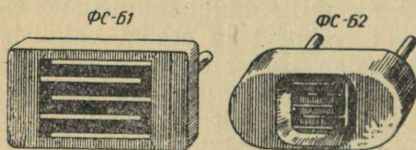
## VISMUTSULFIID-FOTOTAKISTID

Vismutlääke nime all tuntud looduslike kristallide head fotoelektrilised omadused viisid mõttele saada analoogilisi tulemusi sama koostisega, kuid sünteetiliselt toodetud ainetega. Ja tõepoolest, teadlastel õnnestus mitte ainult igakülgsest uurida vismutsulfiidi ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ) füüsikalisi omadusi, vaid ka konstrueerida esimesi fototakistite tüüpe, mida on hakatud tööstuses massiliselt tootma.

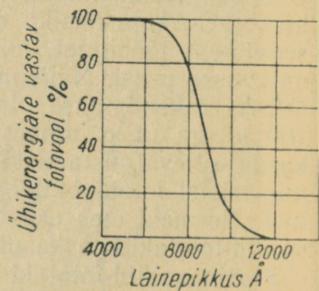
Seda tüüpi fototakistite valmistamistehnoloogia ei erine põhimõtteliselt teistest materjalidest fototakistite valmistamisel kasutatavast. Klaasplaadikesele tekitatakse õhukene vismutsulfiidi kiht. Pooljuhtiva kihile peale kantakse peente ribakestena metallektroodid. Pooled kõikidest ribakestest ühendatakse ühe, ja pooled — teise külgelektroodiga. Pooljuhtiva kihiga ja elektroodidega varustatud klaasplaadike monteeritakse eboniit- või plastmassist kesta, milles on vas-

tavas moodsus ava — «aken». Fototundliku kihi kaitsmiseks mehaaniliste vigastuste ja väliskeskonna mõju eest kaetakse pooljuhtiv kiht läbipaistva lakiga. Kesta tagumisele küljele on monteeritud kaks pistik-elektroodi, millede vahekaugus on valitud nii, et fototakistit saaks asetada lambi normaalsesse pistikupessa. Joonisel 32 on toodud B. T. Kolomiitsi poolt konstrueeritud vismutsulfiid-fototakistite  $\Phi C-B1$  ja  $\Phi C-B2$  väliskuju. Fototakistite  $\Phi C-B1$  ja  $\Phi C-B2$  oomiline takistus kõigub teatavates piirides,  $\Phi C-B2$  puhul näiteks 0,3 ja 50 M $\Omega$  vahel.

Erinevalt seatinasulfiid-fototakistitest paikneb vismutsulfiid-fototakistite spektraalse tundlikkuse maksimum, nagu



Joon. 32. Fototakistite  $\Phi C-B1$  ja  $\Phi C-B2$  väliskuju.



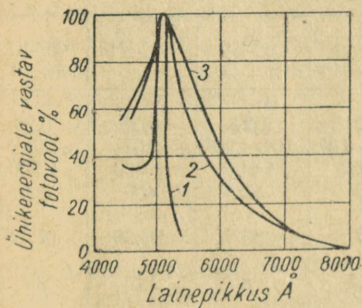
Joon. 33. Vismutsulfiid-fototakisti spektraalse tundlikkuse karakteristik.

näitab joonis 33, spektri nähtavas osas. Nimetatud maksimum ei sõltu küllalt laiades piirides toimuvatest temperatuurimuutustest. Fototakistite  $\Phi C-B1$  ja  $\Phi C-B2$  fotovoolu sõltuvus pingest on lineaarne.

Vismutsulfiid-fototakistitel on üsna suur inertsus. Kuigi fototakistite  $\Phi C-B1$  ja  $\Phi C-B2$  sageduskarakteristikud on tunduvalt paremad kui seleen-fototakistitel ja tallofiididel, piiravad nad siiski nimetatud fototakistite kasutamist kõrgetel sagedustel töötavates seadmetes. Temperatuuri langedes kasvab takistite  $\Phi C-B1$  ja  $\Phi C-B2$  inertsus tunduvalt. Nende integraalne tundlikkus on küllalt kõrge. Üsikutel eksemplaridel tõuseb see 100-luksise valgustustiheuse ja fototakistile rakendatud 80-voldise pinge puhul kuni 80 mA/lm.

## KADMIUMSULFIID-FOTOTAKISTID

Kadmiumsulfidi ( $\text{CdS}$ ) head fotoelektrilised omadused võimaldavad temast valmistada suurepäraseid fototakisteid. Kadmiumsulfiid-fototakisti spektraalsel tundlikkusel on maksimum spektri nähtavas osas, umbes  $5\,300\text{ \AA}$  juures. Joonisel 34 on toodud kolme erinevat tüüpi kadmiumsulfiid-fototakisti spektraalse tundlikkuse karakteristikud.



Joon. 34. Kadmiumsulfiid-fototakistite spektraalse tundlikkuse karakteristikud.

1 — monokristall; 2 — polükristalliline aine; 3 — monokristallne pulber.

pimendatud ja valgustatud pooljuhtiva kihi takistuste suhe hämmastava kõrguseni —  $150\,000$ -ni. See asjaolu annab kadmiumsulfiid-fototakistile suure väärtuse. Nõukogude Liidus toodetakse kadmiumsulfiid-fototakisteid markide  $\Phi\text{C-K1}$   $\Phi\text{C-K2}$   $\Phi\text{C-K0}$  ja  $\Phi\text{CK-M1}$  all. Fototakisti  $\Phi\text{C-K1}$  spektraalse tundlikkuse maksimum paikneb  $5\,200\text{ \AA}$  piirkonnas, fototakistil  $\Phi\text{C-K2}$  asub see aga  $6\,000\text{ \AA}$  juures.

Peale käsitletud fototakistite esineb veel kadmiumseleeniidist ( $\text{CdSe}$ ), seatinaseleniidist ( $\text{PbSe}$ ), germaaniumist ( $\text{Ge}$ ), ränist ( $\text{Si}$ ) ja teistest pooljuhtidest fototakisteid.

Astrofüüsikalistel uurimistel vajatakse näiteks fototakisteid, millede tundlikkuse maksimum asuks spektri infra-punases osas. Seks otstarbeks võib edukalt kasutada seatinasulfiid- ja seatinaseleniid-fototakisteid jahutatud olukorras.

Tabelis 7 on toodud levinumate tööstuslike fototakistitüüpide parameetrid. Fototakisti tundlikkust voolu järgi

(voolu-eritundlikkust) väljendab mikroamprite arv ühe luumeni ja takistile rakendatud pinge ühe voldi kohta. Maksimaalne tundlikkus saadakse eritundlikkuse korrutamisel tööpinge lubatud piirväärtusega. Viimane on mitmesuguste fototakistitüüpide puhul erinev.

Tabel 7  
Fototakistite  $\Phi C-A1$ ,  $\Phi C-B2$ ,  $\Phi C-K1$  ja  $\Phi C-K2$  põhiparameetrid

Fototakisti parameetrid	$\Phi C-A1$	$\Phi C-B2$	$\Phi C-K1$	$\Phi C-K2$
Tööpindala $\text{cm}^2$ . . . . .	0,21	1,21	0,25	0,25
Pimetakistus $\Omega$ . . . . .	$10^4-10^5$	$10^5-10^7$	$10^7$	$10^6$
Eritundlikkus $\mu A/lmV$ . . . . .	5 000	1 000	3 000	2 500
Tööpinge piirväärtus V . . . . .	15	50	400	300
Takistuse suhtelise muutumise keskvärtus % . . . . .	17	83	99,28	97,14
Keskmine takistuse muutumise kordsus . . . . .	1,2	5	140	35
Fotovoolu keskmine temperatuuritegur temperatuurivahemikus $0-40^\circ C$ , $\%/^\circ C$	1,5	1,0	1,4	0,12

Tabelist 7 nähtub, et fototakistitel  $\Phi C-K1$  ja  $\Phi S-K2$  on väga kõrge tööpinge piirväärtus ja suur eritundlikkus.

Takistite  $\Phi C-A1$  ja  $\Phi C-B2$  kohta toodud andmed kehtivad 200-luksise valgustustiheduse puhul; takistite  $\Phi C-K1$  ja  $\Phi C-K2$  kohta esitatud andmed on saadud 100 luksis juures.

## NELJAS PEATÜKK

### TÖKKEKIHIGA FOTOELEMENTID

#### SELEEN-FOTOELEMENTID

1876. aastal avastati Adamsi ja Day poolt täiesti uus nähtus, mida tolleaegne füüsika ei osanud seletada. Avastatud nähe seisis selles, et seleenpulgakese valgustamisel tekkis viimases iseseisev elektromotoorne jõud. Nagu mõnikord avastustega juhtub, unustati see nähe varsti. Ta avastati uuesti alles meie sajandi kolmekümnendatel

aastatel, nimetati tõkkekihi-fotoefektiks ja leidis tõkkekihiga fotoelementides otsekohe praktilist kasutamist.

Esimene seda tüüpi fotoelement valmistati kuprooksüüdist ja ta leidis rea aastate jooksul mõningat rakendamist. Peaaegu samaaegselt leiutati ka seleen-fotoelement, mis levis palju laialdasemalt ja mis pole tänini oma tähtsust veel kaotanud.

Seleen-fotoelemendi valmistamistehnoloogia on tema leiutamises alates läbi teinud rea muutusi.

Iga tõkkekihiga fotoelement, või nagu neid veel nimetatakse — ventiil-fotoelement, kujutab endast süsteemi, mis koosneb metallalusest, õhukesest pooljuhtivast kihist ja pealmisest, poolläbipaistvast metallektroodist. Ventiil-fotoelemendi valmistamisel peab kindlasti kas metallaluse või pealmise, poolläbipaistva elektroodi piirkonnas tekima tõkkekiht.

Valmistatava fotoelemendi alus täidab kahte ülesannet. Ühelt poolt osutub ta rabeda seleenikihi kandjaks, kaitstes seda mehaaniliste vigastuste eest. Teiselt poolt luuakse aluse vahendusel hea elektriline kontakt. Ülaltoodud põhjustel peab alusplaadike olema jäik ja ta valmistatakse 1—2 mm paksusest terasplekist. Kettakujulise aluse see külg, millele kantakse seleenikiht, lihvitakse või töödeldakse liivajoas selleks, et seleen teraskettale hästi liibuks. Lihvitud ketast pestakse hoolega, kuivatatakse ja riputatakse vaakuumseadme kupli alla, lihvitud küljega allapoole.

Seleenikiht kantakse kettale vaakuumis aurustamise meetodil. Selleks asetatakse vaakuumseadme kupli alla nikroomspiraaliga elektrikumutusahi. Viimasesse paigutatakse väike molübdeenklaasist valmistatud kausike, mis täidetakse teatava hulga sulatatud seleeniga. Terasketas asub kausikesest 70—100 mm kaugusel, võimalikult selle keskpaiga kohal, et saada ühtlase paksusega kihti.

Pärast seda, kui vaakuumseadme kupli all on tekitatud umbes  $10^{-4}$  mm elavhõbedasambale vastav hõrendus, juhitakse vool läbi kuumutusahju spiraali säärase arvestusega, et klaaskausikeses leiduv seleen kiiresti vedelduks ja aurustuma hakkaks. Seejärel vähendatakse voolu spiraalis määrani, mis tagab seleeni ühtlast aurumist.

Heade parameetritega fotoelementide saamiseks peab pooljuhtiva kihi paksus olema 0,1 mm.

Pooljuhtiva kihi pealekandmine vaakuumis aurusta-

mise teel võimaldab täpselt saavutada etteantud kihipaksust ja tagab kihi head liibumist ketta koredale pinnale. Aurustatava aine lenduvad molekulid või aatomid täidavad pinna kõik peenimad poorid ja süvendid, mille tulemusel luuakse püsiv, suhteliselt väikese siirdetakistusega elektriline kontakt metalli ja pooljuhi piiril.

Ülalkirjeldatud viisil pealekantud seleen on amorfseks modifikatsioonis, tema eritakistus on väga kõrge ja tal puuduvad veel vajalikud fotoelektrilised omadused. Seejärel viiakse seleen tehnoloogilise protsessi järgmisel etapil amorfsest olekust üle kristallilisse, millel on suur valgustundlikkus. Selleks asetatakse kupli alt väljavõetud seleeniga kaetud ketas otsekohe ahju, mille temperatuur on eelnevalt tõstetud 160—170° C. Seleeni kristalliseerumine, millega kaasub tema musta värvuse halliks muutumine, algab kiiresti. Kui seleeni kogu pind on omandanud halli värvuse, tõstetakse ahju temperatuuri kuni 200—210° C ja valmivat fotoelementi hoitakse selles temperatuuris veel poolteist kuni kaks tundi.

Pealmisele, poolläbipaistvale metallelektroodile esitatakse kaks põhinõuet. Esiteks peab ta vastavas spektri piirkonnas olema küllalt läbipaistev ja, teiseks, asjatute kadude vältimiseks peab tema elektriline juhtivus olema hea.

Kogemused näitavad, et parimaid tulemusi saadakse siis, kui poolläbipaistev elektrood on peale kantud katoodpihustamise menetlusel.

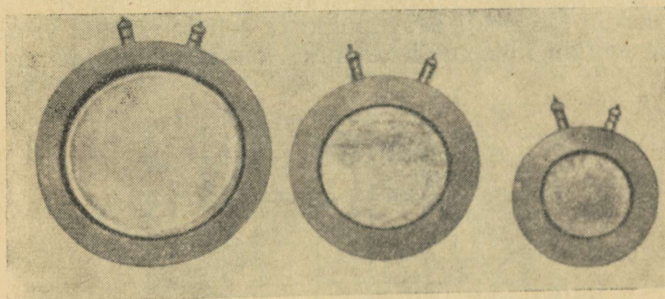
Pealne elektrood kantakse seejuures seleenikihile kõrge positiivse potentsiaali all. Pihustatavat materjali, millele on antud negatiivne potentsiaal, pommitatakse argooni positiivsete ionidega. Viirnased saadakse gaaslahenduse tekitamisega 0,1—0,15 mm elavhõbedasambale vastava rõhu all argooniga täidetud kuplis.

Katoodpihustamise protsessis kuumeneb seleeni pind. Ülekuumenduse vältimiseks toimub pihustamine lühikeste, 10—12 sekundit kestvate perioodidena, mida eraldavad 3—5-minutilised vaheajad.

Vajaliku tundlikkuse saavutanud valmis fotoelemendi kettad monteeritakse eboniit- või plastmassist karbikesse, mis on varustatud kahe väljeklemmiga. Selen-fotoelementide väliskuju on toodud joonisel 35.

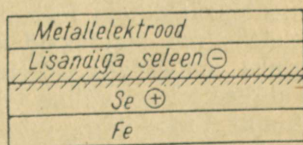
Kaitseks väliskeskkonna kahjuliku toime eest kaetakse fotoelemendi valgustundlik kiht läbipaistva lakikilega.

Seleen-fotoelemendi valmistamistehnoloogia on nii üles ehitatud, et seleenikihihile tuleva poolläbipaistva metall-elektroodi pealekandmisel teatav hulk pealekantava metalli aatomeid seleenisse difundeeruks. Tänu sellele omandab see osa seleenikihist, kuhu metalli aatomid on tunginud, elektronjuhtivuse. Nii teostubki seleen-fotoelemendis kon-



Joon. 35. Seleen-fotoelemendid.

takt elektron- ja aukseeleni vahel. Nende vahele moodustub, nagu joonisel 36 näidatud, tõkkekiht. Fotoelemendi valgustamisel tekivad seleeni välises kihis paarid elektron — auk. Elektronid koonduvad pealmisele elektroodile, kuna augud läbivad tõkkekihi ja liiguvad alumisele elektroodile, laadides selle positiivselt.



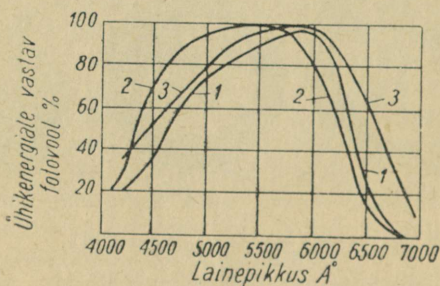
Joon. 36. Seleen-fotoelemendi skemaatiline ehitus (viirutatud piirkond tähistab tõkkekihti).

Seleen-fotoelementide spektraalne tundlikkus haarab praktiliselt kogu nähtava spektri. Lisandite sisseviimine seleeni muudab veidi selle spektraalse tundlikkuse karakteristikut. Kolm säärast karakteristikut on kujutatud joonisel 37. Neist esimene (1) vastab puhtale seleenile, teine (2) — väävlilisandiga seleenile ja kolmas (3) — telluuri- lisandiga seleenile. Lisanditeta seleenist valmistatud fotoelemendi tundlikkuse maksimum asub 5 900 Å piirkonnas. Seleen-fotoelemendi integraalne tundlikkus ületab kõikide välisfotoefektiga fotoelementide vastava tundlikkuse ja ulatub kuni umbes 500  $\mu\text{A}/\text{lm}$ .

Kõikides ventiil-fotoelementides sõltub tekkiva fotovoolu tugevus mitte üksnes valgusvoo intensiivsusest, vaid ka välistakistuse suurusest.

Seleen-fotoelementide sageduskarakteristik on tunduvalt halvem kui välisfotoefektiga fotoelementidel, mistõttu nende kasutamine heli reprodutseerimiseks ei ole otstarbekas.

Tõkkekihi-fotoefekti avastamine ja sellele rajatud ventiil-fotoelementide hilisem leiutamine etendasid teaduses ja



Joon. 37. Seleen-fotoelementide spektraalse tundlikkuse karakteristikud.

tehnikas erakordselt tähtsat osa. Välisfotoefektiga fotoelemente, rääkimata fototakistitest, ei saa nimelt lugeda seadmeteks, mis suudaksid kiirgusenergiat vahetult elektrienergiaks muundada. Ventiil-fotoelementid aga omandavad valguse toimel võime tekitada oma elektromotoorset jõudu. Ainult tõkkekihiga fotoelementid osutuvad järelikult sääraseks tähelepanuväärseteks seadmeteks, mille abil kiirgusenergia vahetult elektrienergiaks muundub.

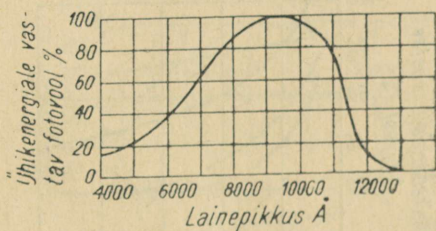
### TALLIUMSULFIID-FOTOELEMENTID

1938. aastal töötas B. T. Kolomiits välja tõkkekihiga talliumsulfiid-fotoelementi.

Kuni 1938. aastani tuntud parima tõkkekihiga fotoelementi — seleen-fotoelementi — tundlikkus ei ületanud  $500 \mu\text{A}/\text{lm}$  ja tema kasutegur oli madal, alla 0,1%. Uue, talliumsulfiid-fotoelementi leiutamine oli suureks sammuks edasi.

Talliumsulfiid-fotoelementide valmistamistehnoloogia ei

ole põhimõttelt keerukas. Algul valmistatakse talliumi ja väävli kokkusulatamise teel talliumsulfiid  $Tl_2S$ . Seejuures on tähtis, et kokkusulatatavad komponendid oleksid keemiliselt võimalikult puhtad. Seejärel kantakse saadud sulam umbes  $600^{\circ}C$  juures vaakuumis aurustamise teel ümmargusele raudalusele. Enne katmist lihvitakse aluse üks külg jämeda karborundiga, et tekitada karedat pinda. Viimane on vajalik selleks, et saada paremat liikumist aluse ja temale kantava pooljuhtiva kihi vahel. Hea kvaliteediga fotoelemendi valmistamiseks tuleb pooljuhtiv kiht



Joon. 38. Talliumsulfiid-fotoelemendi spektraalse tundlikkuse karakteristik.

kanda alusele siis, kui see on kuumutatud temperatuurini  $400^{\circ}C$ . Operatsiooni tulemusel omandab  $Tl_2S$ -kiht selgesti väljenduva kristallilise struktuuri. Mida suuremad on seejuures üksikute kristallide mõõted, seda suurem on fotoelemendi tundlikkus ja temas tekkiv elektromotoorne jõud.

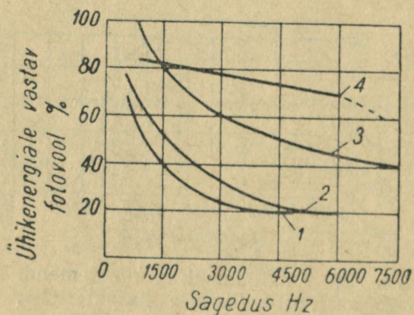
Pärast  $Tl_2S$ -kihi tekkimist võetakse alus vaakuumseadme kupli alt välja ja kuumutatakse õhu käes, mis puhul toimub osaline oksüdeerumine. Viimane on vajalik pooljuhtivale kihile nõutavate omaduste andmiseks.

Seepeale luuakse  $Tl_2S$ -kihile katoodepihustamise meetodil poolläbipaistev kullakiht, mis moodustab ühe elektroodi. Väliskeskkonna halbade mõjude, eriti aga niiskuse eest kaitsmiseks kaetakse kuldelektrood läbipaistva lakiga. Pärast seda asetatakse kogu süsteem klaaskolbi, mis pumpatakse õhust tühjaks. Kui on saavutatud  $10^{-5}$  mm elavhõbedasambale vastav hõrendus, juhatakse klaaskolbi 300—400 mm Hg rõhu all vesinikku, klaaskolb joo-detakse kinni ja eraldatakse vaakuumseadme küljest. Vastavalt kasutamisetstarbele valmistatakse talliumsulfiid-fotoelemente mitmesuguse kuju ja erinevate mõõdetega.

Talliumsulfiid-fotoelementide näitajad on väga head. Nende integraalne tundlikkus ulatub 10 000  $\mu\text{A}/\text{lm}$ , s. t. ületab 20 korda seleen-fotoelementide tundlikkuse. Ka kasutegur on talliumsulfiid-fotoelementidel suhteliselt kõrge, tõustes üksikute eksemplaride juures 1,1%-ni.

Talliumsulfiid-fotoelementide spektraalne tundlikkus haarab, nagu näitab joonis 38, laia spektriosa, kusjuures tundlikkuse maksimum asub lähisinfrapunases osas.

Talliumsulfiid-fotoelemendil on veel üks hea omadus: temas tekkiv fotovool on võrdeline valgusvoo intensiiv-



Joon. 39. Ventiil-fotoelementide sageduskarakteristikud.

1 — seleen-fotoelement; 2 — kuproks-fotoelement; 3 ja 4 — talliumsulfiid-fotoelementid.

susega. Peab aga tunnistama, et see võrdelisus säilib ainult sel juhul, kui välisvooluringi takistus on küllalt väike.

Nagu selgub jooniselt 39, osutub talliumsulfiid-fotoelementide sageduskarakteristik teiste ventiil-fotoelementide sageduskarakteristikutest tunduvalt paremaks. See asjaolu võimaldab neid kasutada heli reprodutseerimiseks.

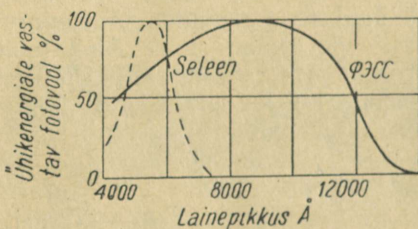
### HÖBESULFIID-FOTOELEMENTID

1941. aastal loodi hõbesulfiidist ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) ventiil-fotoelementid. Neid fotoelemente toodetakse markide  $\Phi\text{ЭCC-Y2}$ ,  $\Phi\text{ЭCC-Y3}$  ja  $\Phi\text{ЭCC-Y10}$  all. Markeeringus esinev arv tähistab fotoelemendi tööpinda ruutsentimeetrites.

Fotoelementide  $\Phi\text{ЭCC}$  integraalne tundlikkus on väga

kõrge ja ulatub üksikutel eksemplaridel kuni  $8\,600\ \mu\text{A}/\text{lm}$ . Tavaliselt kõigub nende tundlikkus  $6\,000$  kuni  $7\,000\ \mu\text{A}/\text{lm}$  vahel, kui valgusallika temperatuur on  $2\,300^\circ\text{K}$ . 25-luksise valgustiheduse juures ulatub nende fotoelektromotoorne jõud kuni  $0,16$  millivoldini.

Hõbesulfiid-fotoelemendid on töötamisel küllalt stabiilsed ega vanane määral, mis piiraks nende edasist kasutamist. Fotoelementide  $\Phi\text{ЭCC}$  vananemine avaldub selles, et nende sisetakistus aja jooksul kasvab, kuna lühisfotovool seejuures väheneb.



Joon. 40. Fotoelemendi  $\Phi\text{ЭCC}$  spektraalse tundlikkuse karakteristik.

Piirkonnas  $4\,000$  kuni  $12\,000\ \text{Å}$  on hõbesulfiid-fotoelementidel küllalt kõrge spektraalne tundlikkus. Viimase maksimum asub spektri lähisinfrapunases osas ( $8\,000$ — $9\,000\ \text{Å}$ ). Joonisel 40 on kujutatud fotoelemendi  $\Phi\text{ЭCC}$  spektraalse tundlikkuse karakteristik. Võrdluseks on toodud sama karakteristik ka tavalise seleen-fotoelemendi kohta.

Erinevalt talliumsulfiid-fotoelemendist on fotoelemendi  $\Phi\text{ЭCC}$  fotovoolu sõltuvus valgusvoo intensiivsusest lineaarse iseloomuga ainult väikeste,  $100$ — $120$  luksini ulatuvate valgustiheduste puhul.

Hõbesulfiid-fotoelemendid on suure inertsusega.

## PÄIKESEPATAREI

Säärane nimi on antud uuele räni-fotoelemendile. See fotoelement loodi 1953. aastal ja ta kujutab endast kiirgusenergia elektrienergiaks muundajat. Sedatüüpi seadmete kohta on tal väga kõrge kasutegur, mis ulatub  $6\%$ -ni.

Räni on pooljuhi omadustega element, mis kuulub

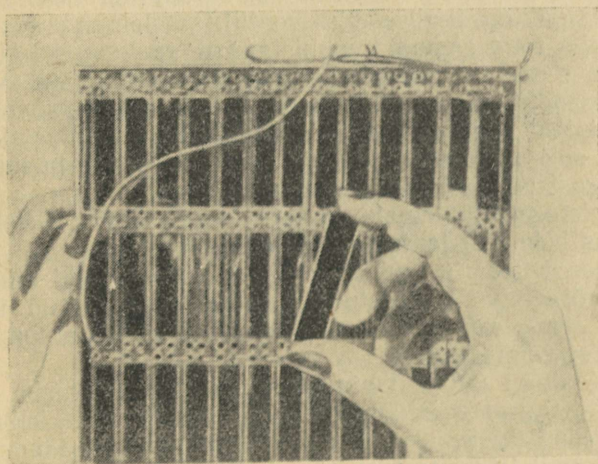
perioodilise süsteemi IV rühma. Oma leviku poolest looduses on ta teisel kohal. Tema aatomkaal on 28,06 ja järjekorranumber 14. Kristallilise räni sulamistäpiks on  $1415^{\circ}\text{C}$ , keemistäpiks —  $2360^{\circ}\text{C}$ . Räni elektriline erijuhtivus kõigub, olenedes temas leiduvate lisandite liigist ja hulgast, küllalt suurtes piirides —  $7 \cdot 10^2$  kuni  $10^{-2} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ . Viimane siintoodud suurustest vastab puhta räni elektrijuhtivusele. Nagu kolmel teiselgi IV rühma elemendil, on ka ränil teemanditüüpi kristallvõre.

Räni on juba võrdlemisi hulga aastate jooksul olnud igasuguste füüsikaliste uurimuste objektiks. Viimastel aastatel on füüsikud oma peamise tähelepanu koondanud just räni elektrilistele omadustele. Aastatepikkuste uurimistööde tulemuseks saadi resultaadid, millel on suur väärtus nii teooriale kui ka praktikale. Nimetatud resultaatide seas on suur tähtsus meetodil, mis võimaldab saada ettemääratud juhtivusmehhanismiga (kas elektronvõi aukjuhtivusega) räni. See meetod annab võimaluse ränidetektorite väljatöötamiseks. Sama tähtsaks tuleb kahtlemata lugeda ka räni monokristallise võõraatomitest lisandite sisseviimise tehnoloogia leiutamist, mis võimaldab saada ühes kristallis  $p-n$ -siiret. Viimasele aga ongi rajatud tõkkekihiga räni-fotoelement.

Räni-fotoelemendi valmistamistehnoloogia on küllaltki keerukas. Kokkuvõttes koosneb see järgmistest operatsioonidest. Algul kasvatatakse sulatatud ränist suuri monokristalle. Monokristallide kasvatamine võib toimuda mitmel viisil. Ühe meetodi järgi kastetakse sulatatud ränisse nn. alge ja tõstetakse väga aeglaselt üles. Alge, s. o. antud aine väikene monokristall, kujutab endast kristallisatsioonitsentrit, mille ümber jätkub kristalliseerumine. Algme aeglasel tõstmisel algab räni monokristalli pidev moodustumine. Sel viisil saadakse küllalt suurte mõõdetega kristalle. Kogu kirjeldatud protsess viiakse läbi kõrgvaakuumis. Räni kuumutatakse kõrgsagedus-induktsioonahjus.

Saadud räni monokristallid lõigatakse õhukesteks täisnurkseteks plaadikesteks, millel on elektronjuhtivus. Tõkkekihiga fotoelemendi loomiseks on aga tarvis süsteemi kahest, erineva juhtivusmehhanismiga pooljuhust. Selle saavutamiseks kaetakse plaadikese üks pind ühtlase õhukese boorikihiga ning kuumutatakse teda elektriahjus, kusjuures vaakumpumbad peavad pidevalt töötama. Difu-

sioonkuumutamise kestus valitakse niisugune, et boori aatomid jõuaksid difundeeruda plaadikesse ainult selle paksuse teatava osa ulatuses. Kuna boori lisand põhjustab räni aukjuhtivust, siis üks osa räniplaadikesest saab sel viisil aukjuhtivuse, kuna teisele osale jääb endiselt elektronjuhtivus. Nimetatud osasid eraldaval piiril tekib  $p-n$ -siire ja selle tulemusel tõkkekiht. Räniplaadikese mõlemale pinnale moodustatakse erimeetodil metallektroodid, milledest üks on poolläbipaistev. Seepeale asetatakse plaadikene kahe väljejuhtmega varustatud kesta.



Joon. 41. «Päikesepatarei» väliskuju.

Fotoelemente võib omavahel ühendada järjestikku ja paralleelselt, mille tulemusel saadakse fotoelektriline patarei. Ühe säärase patarei väliskuju on toodud joonisel 41. Niisugust patareid võib kasutada elektrifitseerimata rajoonides kantavate raadiosaatjate ja -vastuvõtjate, telefonijaamade jt. toiteks. Juba pooljuhtide tehnika praeguse taseme juures võimaldavad räni-fotoelemendid selgel päikesepaistelisel päeval saada kuni 50 W elektrilist võimsust fotoelemendi pinna igalt ruutmeetrilt, kusjuures kasutegur on umbes 6%. Tõkkekihiga fotoelementide kasutamise võimaluste õigeks hindamiseks piisab, kui meenutada, et auruvedurite kasutegur ei ületa 6–8%. Lisaks sellele tuleb silmas pidada, et erinevalt teistest energia-

muundajatest võib pooljuhtidest fotoelementide tööiga olla väga pikk, mõningatel juhtudel koguni praktiliselt piiramatut.

### KADMIUMSULFIID-FOTOELEMENT

Peaaegu üheaegselt räni-fotoelemendiga leiutati ka uus tõkkekihiga kadmiumsulfiid- (CdS) fotoelement. Kadmiumsulfiidi head fotoelektrilised omadused olid füüsikutel teada juba suhteliselt ammu.

Kadmiumsulfiid-fotoelemendi struktuur ei erine millegagi ükskõik missuguse teise ventiil-fotoelemendi struktuurist. Selle fotoelemendi valmistamise raskus seisib aga kristalli sees asetseva  $p-n$ -siirde moodustamises. Vastavate lisandite sisseviimisega õnnestus saada monoliitses kristallis kaks teineteisega kontakteeruvat tsooni, milledest üks on auk- ja teine elektronjuhtivusega. Selle tulemuseks on, nagu teada, tõkkekihi moodustumine.

Fotoelemendi mõlemale pinnale kantakse metallelektroodid: üks hõbedast ja teine indiumist.

Esimesed kadmiumsulfiid-fotoelementide tüübid olid väikeste mõõdetega. Valgustundlik pind ei ületanud ühelgi neist  $4 \text{ cm}^2$ , mis piiras fotoelemendi poolt arendatavat elektrilist võimsust.

Ühes, ainult  $0,8 \text{ cm}^2$  pindalaga katseeksemplaris, mida valgustati otseste päikesekiirtega, tõusis fotoelektromotoorne jõud  $0,3$  voldini. Seda elektromotoorset jõudu võib fotoelemendi leidurite kinnituse kohaselt tõsta kuni  $2-2,5$  voldini. Fotoelemendi kasutegur peab teoreetiliste arvutuste alusel olema umbes  $18\%$ . Kadmiumsulfiid-fotoelemente käsitleva artikli avaldanud ajakirja teadaande kohaselt on nimetatud fotoelementidest generaatori muundamisvõime erakordselt suur. Vahvlipaksune kristallist plaat, mõõtmetega  $1,2 \times 4,5 \text{ m}$ , asetatuna maja katusele või monterituna sellesse, võib konstruktorite arvates anda energiat, millest piisab väikese elumaja pidevaks valgustamiseks, külmutuskappide töös hoidmiseks ja muude mugavuste loomiseks.

Seoses ülaltooduga on õpetlik pöörduda mõttes  $25$  aastat tagasi. Meenutame, et tol ajal, erinevalt tänapäevast, pooljuhtide füüsikat veel ei eksisteerinud. Kuid akadeemik A. F. Joffe, andes õige hinnangu tõkkekihiga fotoelementide tulevikuvõimaluste kohta, kinnitas juba siis, et kiir-

gusenergia elektrienergiaks muundamine peab suure kasuteguriga toimuma pooljuht-fotoelementide abil.

Kaasaegsete teoreetiliste kaalutluste kohaselt peab ventiil-fotoelementide kasutegur tõusma 40—50%-ni.

Niisuguste võimaluste realiseerimine annaks inimkonna kasutusse uued ammendamatud energiaallikad.

## GERMAANIUM-FOTODIOODID

Nagu juba märgitud, kasutatakse kõiki ventiil-fotoelemente säärases režiimis, mis ei näe ette fotoelemendi vooluringi pingeallika lülitamist. Ventiil-fotoelemendid on ise elektromotoorse jõu allikaiks, mille kasutamisele ongi paljud fotoelektrilised lülitused rajatud. Kuid juba 1953. aastal tõestati, et real juhtudel on otstarbekas kasutada ventiil-fotoelemente ka sääraustes lülitustes, milledes esineb fotoelemendiga järjestikku ühendatud suhteliselt kõrge pinge allikas, kusjuures viimane on rakendatud tõkkesuunas. Niisugusel režiimil töötav fotoelement on saanud fotodiooni nimetuse.

Kuna fotodioonile rakendatakse tõkkesuunas võrdlemisi kõrge pinge, siis ei kõlba seks otstarbeks kaugeltki mitte iga ventiil-fotoelement. Kõikide olemasolevate ventiil-fotoelementide juures põhjustab juba suhteliselt madal vastupinge teatavasti läbilööki. Seetõttu valmistas fotodiooni leiutaja J. Shive selle kõrgeoomilisest germaaniumist. See seadis sai fotodiooni nimetuse ainult seetõttu, et tema konstruktsioon, nagu muide kõigi teistegi ventiil-fotoelementide oma, ei erine põhilises osas germaanium-pinddiooni konstruktsioonist.

Germaanium-fotodioon on ehitatud järgmiselt. Germaaniumi monokristallis luuakse vastavate lisandite sisseviimisega kaks tsooni  $p$  ja  $n$ , millede vahele tekib tõkkekiht. Monokristalli ühele pinnale kantakse poolläbipaiste metallielektrood, kuna teisele pinnale moodustatav elektrood on suhteliselt massiivne. Monokristall monteeritakse kesta, mis on varustatud kahe väljaviigu ja aknakesega.

Fotodiooni töötamise mehhanism on samasugune nagu mistahes teiselgi ventiil-fotoelemendil. Oletame, et  $n$ -germaaniumile langeb valgusvoog. Selle toimel tekivad  $n$ -kihis paarid elektron—auk. Tõkkekihi kontaktvälja mõjul liiguvad augud läbi tõkkekihi  $p$ -germaaniumisse, laadides

selle positiivselt. Välise elektrivälja puudumisel lakkab mittepõhiliste voolukandjate üleminek varsti ja pealmise ning alumise elektroodi vahele jääb teatav potentsiaali-vahe. Fotodiodile tõkkesuunas rakendatud väline elektri-väli tugevdab mittepõhiliste fotovoolu kandjate ülemine-  
kut *n*-germaaniumist *p*-germaaniumisse veelgi. Selle nähte põhjuseks on asjaolu, et tõkkesuund vastab olukorrale, kus *n*-germaanium on ühendatud generaatori positiivse ja *p*-germaanium — selle negatiivse poolusega.

Uues olukorras on aukude *n*-germaaniumist *p*-germaa-  
niumisse siirdumine määratud kristallile rakendatud elekt-  
rivälja tugevusega, mis tunduvalt ületab kontaktvälja  
tugevuse *p*—*n*-siirdel.

Kui ühendada fotodiodid vooluringi takistusega *R*, siis  
selles vooluringis esinev vool võib põhjustada takistusel  
*R* tunduva pingelangu. Oma suuruselt läheneb viimane  
pingele, mida annab fotodiodi vooluringi lülitatud patarei.

Fotodiodi vooluringi ühendatud suhteliselt kõrge pinge,  
mis ulatub mõnekümne voldini, võimaldab saavutada suurt  
tundlikkust pinge suhtes.

Germaanium-fotodiodidel on kõrge, 40 000  $\mu\text{A}/\text{lm}$  ula-  
tuv integraalne tundlikkus. Nende spektraalse tundlikkuse  
maksimum asub spektri infrapunases osas, mis vastab  
lainepikkusele umbes 15 000 Å.

## FOTOTAKISTITE JA FOTOELEMENTIDE KASUTAMISEST

Fotoelektriliste seadmete kasutamisalad laienevad aast-  
tast aastasse. Kaasaegne tehniline progress, mis on vahe-  
tult seotud automaatika intensiivse arenguga, on suurel  
määral tingitud teoreetilise ja praktilise elektroonika edu-  
sammudest.

Pakkudes suurt huvi teoreetilisele füüsikale, kuulub  
fotoefekt ühtlasi ka säärase arvukate füüsikaliste nähtuste  
hulka, mis on leidnud kasutamist kõige mitmekesisemates  
tehnikaharudes. Meie ajal on fotoelement muutunud üheks  
levinumaks ja mõnikord koguni asendamatuks seadmeks.  
Tänu tema laialdasele tehnikasse juurutamisele, hakkas  
rääkima «suur tumm» — kino, muutus ohutumaks töö,  
automatiseeriti paljud tootmisprotsessid, teostati tele-  
visioon jne. Fotoelementid täidavad arvukaid ülesandeid:  
sorteerivad kõiki võimalikke esemeid, praagivad välja mit-

tekvaliteetset toodangut, reguleerivad transpordivahendite liiklust, jälgivad kütuse õiget põlemist, reguleerivad ahjude temperatuuri, süütavad ja kustutavad automaatselt tänavavalgusteid ja paakide (poide) signaaltulesid, peavad kindlat ja suikumatut valvet, signaliseerivad algavast kahjutulest, väldivad avariisid raudteetranspordis.

Fotoelemente kasutatakse sama laialdaselt ka teadusliku töö praktikas. Fotoelektriliste seadmete ja lülituste kasutamine laboratooriumis osutub erakordselt efektiivseks. Tähtsad, varem raskestilahendatavad ülesanded lahendatakse fotoelektriliste seadmete abil elegantselt ja lihtsalt. On olemas terveid teadusharusid, kus fotoelemendid osutuvad asendamatuiks tööriistadeks uute loodusnähetu uurimisel. Fotoelementide ja sekundaarelektronide emissiooni arvel fotovoolu võimendavate elektronkordistajatega varustatud fotomeetrite, fotoniloendajate ja teiste tundlike fotoelektriliste aparatuuride kasutuselevõtt võimaldas viimaste aastate jooksul saada uusi andmeid tuumaprotsessidest, atmosfääri ülemiste kihtide helendumisest, valguse hajutamisest molekulide poolt, Galaktika ehitusest jne.

Arvukates fotoelektrilistes lülitustes rakendatakse peamiselt fotoelemendi kaht alljärgnevat omadust: fotovoolu sõltuvust valgusvoo intensiivsusest ja voolu tekkimist valguse toimel. Enne kui asuda fotoelementide praktilise rakendamise konkreetsete näidete juurde, meenutame, et vool, mis tekib fotoelemendis valguse toimel, on suhteliselt nõrk. Edasi märgime, et fotoelektrilisse seadeldisse kuulub peale fotoelemendi veel sageli ka elektromagnetiline rele. Elektromagnetilise rele kombinatsiooni fotoelemendi ja fotovoolu võimendava lampvõimendajaga nimetatakse fotoreleeks.

Lülitustes, kus esineb elektromagnetiline rele, on viimane alati ühenduses välisvooluringiga, mille rele kas suleb või avab.

**Fotoelement ohutustehnikas.** Fotoreleed kasutatakse laialdaselt õnnetusjuhtumite ärahoidmiseks. Ohtlikku kohta läbib valgusejuga, mis valgustab kõrvaleasetatud fotoelementi. Niikaua kuni valgusejuga fotoelemendile langeb, kulgeb fotorele vooluringis pidev vool ning elektromagnetilise rele ankur on tõmmatud vastu magneti raudsüdamikku. Niipea kui valgusejuga katkeb, katkeb ahelas ka vool, ankur tõuseb raudsüdamikult üles ja suleb välis-

ahela, mis paneb tööle pidurseadise. Seetõttu näiteks olukorras, kus ohtlikku tsooni pressi all satub juhuslikult töölise käsi, katkestab see valgusejoa ja press seiskub.

**Toodete automaatne loendamine.** Tehastes ja vabrikutes, kus valmistatakse suurel hulgal standardseid tooteid, esineb vajadus neid loendada. Real juhtudel ei saa toodete loendamist läbi viia mehaaniliste kontaktloendajatega. See kehtib näiteks kõikide hõõguvate metalltoodete puhul. Kaasaegne fotoelektriline automaatloendaja loendab aga ühesuguse täpsusega mistahes esemeid: suuri või väikseid, külmi või kuumi. Fotoelektrilise automaatloendaja ehituse põhimõte on väga lihtne. Ühel pool konveierlinti asetseb läätsega varustatud lamp ja teisel pool fotorelee. Kitsas valgusejuga katkestatakse konveieril liikuvate toodete poolt. Fotorelee paneb tööle kiiretoimelise elektrilise loendaja, mis märgib üles möödaliikuvate toodete arvu. Nii loendatakse näiteks jäätisebrikette, seebitükke, tikutoose jne.

**Valtspingi automaatne juhtimine.** Fotoelement on leidnud kasutamist ka metallurgiatööstuses, muuhulgas valtspinkide juhtimisel. Selleks asetatakse ühele poole valtse valguseallikas, mis saadab välja peaaegu paralleelse valgusejoa ja teisele poole fotorelee. Kui valtseitav ese — toorik, tala või rööbas — läbib valgusejoa, hakkab fotorelee tööle ja lülitab sisse mehhanismi, mis muudab valtseid pöörlemissuunda.

**Vedeliku taseme signalseerija ja reguleerija.** Tuntakse mitut moodust, mis võimaldavad fotorelee abil automaatselt ja suure täpsusega reguleerida vedeliku taseme püsivust paakides. Ühe niisuguse mooduse rakendamisel varustatakse paagi kaks vastaskülge etteantud kõrgusel väikeste, klaasiga kaetud aknakestega. Läbi ühe aknakese juhitakse valgusejuga, kuna teise ette asetatakse võimendajaga ühendatud fotoelement. Paagis, vedeliku pinnal asub ujuk. Lihtsa seadise abil hoitakse ujuk alati vedeliku pinna keskel. Vastavalt sellele, kuidas vedeliku hulk väheneb, vajub ujuk järjest madalamale. Lõpuks laskub ujuk valgusejoa tasemele ja katkestab selle, mis paneb tööle fotorelee. Fotorelee käivitab mehhanismi, mis avab kraani, mille kaudu paak uuesti vedelikuga täitub. Vedeliku taseme tõus üle valgusejoa ülemise ääre sulgeb kraani automaatselt. Analoogiline seadis on kasutusel ka tõrte, puukrite, kastide ja teiste spetsiaalsete puistematerjalimahutite

täitumistaseme kontrollimiseks ja vastavaks signaliseerimiseks. Sel puhul langeb muidugi ära vajadus ujuki järele. Valgusejuga katkestatakse vahetult puistematerjali enda — liiva, söe, vilja, jahu jne. poolt.

**Kõvaduse kontrollimine.** Toodete kvaliteedi kontrollkatsetamiseks kasutatakse sageli spetsiaalseid fotoelektrilisi seadmeid. Fotoelemendi abil prakeeritakse näiteks mootorikolbide sõrmi nende kõvaduse alusel. Konveierilindil liikuvale kolvisõrmele langeb väikene terashaamrikene ja pörkab seejärel kolvisõrmelt üles. Kui kolvisõrme kõvadus vastab normile, pörkab haamrike teatavale kõrgusele ja katkestab fotoelemendile langeva valgusejoa. Selle tagajärjel hakkab relee tööle ja paneb käima mehhanismi, mis lükkab kolvisõrme konveierilinti mööda edasi. Kui kolvisõrme kõvadus osutub ettenähtust väiksemaks, ei pörka haamer pärast lööki küllalt kõrgele ja relee ei reageeri. Sel puhul lükatakse väljapraagitud kolvisõrm eriseadise poolt kasti. Kirjeldatud automaat katsetab tunnis kuni 2 000 kolvisõrme.

**Metall-lehtmaterjali katsetamise aparaat.** Fotoelektrilise seadise abil kontrollitakse, kas metall-lehtedes ei esine auke ega pragusid. Ühel pool lehte liigub valgusejuga ja teisel pool sünkroonselt valgusejoaga — fotoelement. Valgusejoa ja fotoelemendi abil uuritakse läbi kogu lehe pind. Kui kiirtevihku satub auk või pragu, lülitub sisse signaal-seadis.

**Fotoelektriline termostaat.** Termostaati pistetakse läbi tema kaanes oleva erilise ava termomeetri kuulike. Elekt rilambi valgusekiired koondatakse kumerläätse abil termomeetrile nii, et nad langeksid etteantud temperatuurile vastavale elevhõbedasamba tasemele. Teisele poole termomeetrit, otse valgusejoa vastu, seatakse võimendajaga ühendatud fotoelement. Kui temperatuur termostaadis tõuseb, siis sulgeb kerkiv elavhõbedasammas fotoelemendile langevale valgusejoale läbipääsu. See aga põhjustab relee rakendumist ja järelikult voolu katkestamist. Teatava aja möödudes langeb termostaadi temperatuur etteantud tasemeni, elavhõbedasammas tuleb tagasi oma lähteasendisse ja valgusejuga langeb uuesti fotoelemendi pinnale. Selle tulemusel lülitab fotorelee elektrivoolu uuesti sisse ja termostaadi temperatuur hakkab tõusma.

Kirjeldatud aparatuuri saab teha väga tundlikuks, nii et ta reageerib kuni ühe kümnendikkraadisele temperatuuri-

muutusele. Lisaks sellele võimaldab ta väga lihtsalt — termomeetri tõstmise või allalaskmisega — stabiliseeritava temperatuuri muuta.

**Nefelomeeter.** Vedelike või gaaside läbipaistvuse määramiseks kasutatakse nefelomeetriks nimetatavat eriaparaati. Fotoelemendiga objektiivsesnefelomeetris koondatakse vastava valgusallika poolt antud valguskiired läätstes ja juhitakse läbi uuritavat vedelikku sisaldava anuma. Edasi satub paralleelne valgusejuga fotoelemendile, mis on ühendatud vastavasse ahelasse. Suhtelistes ühikutes avaldatav läbipaistvus määratakse ülalkirjeldatud katsel saadud fotovoolu suhtest fotovoolusse, mida annaks vahetult valgustatud fotoelement.

**Fotoelektriline fotomeetria.** Fotoelemente kasutatakse laialdaselt ka fotomeetrias. Mõningate fotoelemenditüüpide puhul esinev fotovoolu lineaarne sõltuvus elemendile langeva valguse intensiivsusest teeb need selleks otstarbeks eriti väärtuslikeks.

Meteoroloogilistest tingimustest või kellaajast sõltuva valgustustiheduse mõõtmiseks on välja töötatud mitmed registreerivate fotoelektriliste objektiivsete fotomeetrite konstruktsioonid.

Päevavalguse fotometreerimiseks tuleb kasutada sääraseid fotoelemente, millede spektraalne tundlikkus ühtib inimsilma vastava tundlikkusega.

Fotoelementide abil fotometreeritakse ka kaugete tähtede valgust. Spektri ultravioletse osa suhtes tundlikke fotoelemente rakendatakse ultravioletse kiirguse fotometreerimiseks.

**Foto-eksponomeeter.** Eksponomeeter kujutab endast tükkekihiga seleen-fotoelementi, mis on monteeritud ühte karpi koos tundliku millivoltmeetriga. Pildistamise eel suunatakse fotoelemendi pind pildistatavale objektile. Eksponomeetri millivoltmeetri näidud muutuvad seejuures sõltuvalt valgustustihedusest. Mõõteriista skaalale on vahetult kantud säritusajad.

**Fotoelektriline paagivalvur (poivalvur).** Teatavasti sõidab laevatatavatel jõgedel paagivalvur kaks korda ööpäevas paakide juurde selleks, et neid algul süüdata ja hiljem, koidiku saabumisel, kustutada. Kogu seda tööd võib teha fotoelement. Selleks varustatakse paak fotoreleega. Videviku saabudes süütab fotorelee automaatselt elektri-

valgustuse. Koidikul, kui saabuv päevavalgus on saavutanud teatava tugevuse, kustutab fotorelee elektrilambi.

**Fotoelement helikinos.** Helikinos ei ole heli reprodutseerimine teostatav ilma fotoelemendita.

Vaatleme selle protsessi põhimõtteskeemi.

Elektrilambist väljuv peen valgusejuga projitseeritakse kinofilmil heliribale. Läbinud filmi, satub valgusejuga fotoelemendi. Filmi edasiliikumisel muutub fotoelemendi valgustustihedus vastavalt filmi läbipaistvusele. Selle tulemuseks on fotovoolu tugevuse ja sageduse täpne vastavus üleskirjutatud helivõnkumise intensiivsusele ja sagedusele. Fotovool võimendatakse ja juhitakse valjuhääldajasse.

Toodud näidetega ei ole fotoelementide kasutamise võimalused ammendatud. Fotoelemente kasutatakse automaatsel kaalumisel, uste automaatseks avamiseks ja sulgemiseks, detailide mõõdete kontrollimisel, automaatsel fotografeerimisel, gaasianalüsaatorites ja paljudel teistel juhtudel.

## VIIES PEATÜKK

### POOLJUHT-TERMOTAKISTID

#### TÖÖTAMISPÕHIMÕTE JA KARAKTERISTIKUD

Pooljuhtide takistuse tunduv sõltuvus temperatuurist võimaldas konstrueerida tundlikke termotakisteid, mida nimetatakse ka termisterideks. Need kujutavad endast suure temperatuuriteguriga pooljuhist masstakisteid. Termotakistites kasutatakse aineid, millede elektriline eritakistus  $\rho$  vastab takisti kasutusala. Neid võib valmistada nii elektron- kui ka aukjuhtivusega pooljuhtidest ja samuti lisanditeta ainetest. Termotakisti materjali põhilisteks parameetriteks, mis määravad selle kvaliteedi, on temperatuuritegur  $\alpha$ , keemiline stabiilsus ja sulamistapp.

Enamik termotakistitüüpe töötab häireteta ainult teatavates temperatuuripiirides. Iga normi ületav ülekuumemine mõjub termotakistile halvasti ja võib mõnikord selle rikkuda.

Kaitseks väliskeskkonna, esmajärjekorras õhuhapniku kahjuliku mõju eest paigutatakse termotakistid mõnikord klaaskolbi, mis täidetakse inertse gaasiga.

Termotakisti konstruktsioon on väga lihtne. Pooljuhi tükikesele antakse niidi, pulga, täisnurkse plaadi, kera

või mõni muu kuju. Termotakisti vastaspooltesse asetatakse väljejuhtmed. Termotakisti oomiline takistus on reeglina teiste lülituselementide takistusest tunduvalt suurem, ja mis peaaigi, sõltub järsult temperatuurist. Seetõttu määrab vooluringis kulgeva voolu põhiliselt just termotakisti oomiline takistus, või, lõppkokkuvõttes, tema temperatuur. Termotakisti temperatuuri tõusmisel tugevneb vool vooluringis ja, vastupidi, temperatuuri langemisel nõrgeneb.

Termotakisti võib kuumeneda soojuse arvel, mida ta saab väliskeskkonnast või teda läbiva elektrivoolu poolt temas endas eralduvast soojusest või lõpuks eriliste küttemähiste toimest. Termotakisti kuumutamise viis on vahetult seotud tema praktilise kasutamise tingimustega.

Termotakisti takistus võib sõltuvalt temperatuurist muuta tuhandekordseks. Säärane muutus on iseloomulik termotakistitele, mis on valmistatud halva juhtivusega materjalidest. Heade elektrijuhtide puhul on suhe  $R_{\max}/R_{\min}$  kümne piirides.

Igal termotakistil on teatav soojuslik (termiline) inert, mis teatavatel juhtudel ei oma praktiliselt mingit tähtsust, teistel juhtudel aga mõjub negatiivselt ja piirab termotakistite kasutusvõimalusi. Termiline inert avaldub selles, et kuumutatava termotakisti temperatuur ei tõuse kuumutaja temperatuurini silmapilkselt, vaid alles pärast teatava ajavahemiku möödumist. Termotakisti termilist inertsi võib iseloomustada nn. ajakonstandiga  $\tau$ . Ajakonstandi arväärtus võrdub ajaga sekundites, mille jooksul  $0^{\circ}\text{C}$  juures viibinud ja  $100^{\circ}\text{C}$  temperatuuriga keskkonda ületoodud termisteri takistus langeb 63%-ni algväärtusest.

Enamikul pooljuht-termotakistitel on takistuse sõltuvus temperatuurist mittelineaarne (joon. 42). Termotakisti termiline inert erineb vähe elavhõbetermomeetri omast.

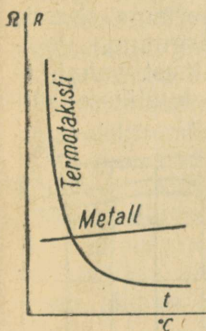
Normaalsel ekspluaterimisrežiimil muutuvad termotakisti parameetrid aja jooksul vähe, mistõttu nende kasutusiga on küllalt pikk, ulatudes mõnedel termotakistimarkidel mitme aastani.

Näidetena käsitleme lühidalt kolme termotakistitüüpi: MMT-1, MMT-4 ja MMT-5.

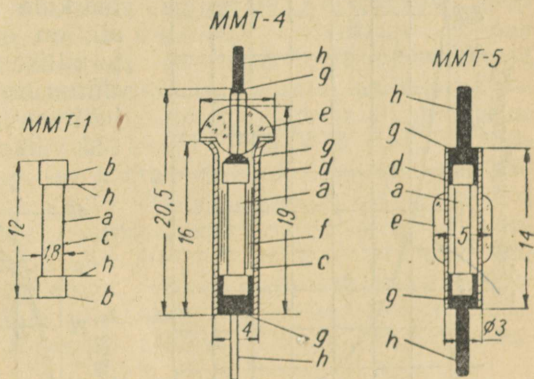
Joonisel 43 on näidatud nimetatud takistite põhimõtteline ehitus ja konstruktsioon. Termotakisti MMT-1 on väljastpoolt kaetud emailvärviga. See tüüp on ette nähtud töötamiseks kuivades ruumides. Termotakistid MMT-4 ja MMT-5 on hermeetiliselt suletud metallkapslitesse. See-

tõttu ei allu nad keskkonna kahjustavale toimele, võivad töötada igasuguses niiskuses ja koguni vedelikes (sääras-tes, mis ei mõju agressiivselt termotakisti metall-kestale).

Termotakistite oomiline takistus on temperatuuril  $20^{\circ}\text{C}$  1 000 kuni 200 000 oomi piirides. Nende takistuse tempe-



Joon. 42. Termotakisti ja metalli takistuse sõltuvus temperatuurist.



Joon. 43. Termotakisti konstruktsioon ja mõõted.

*a* — termotakisti element; *b* — kontaktkübarad; *c* — emailvärvikiht; *d* — metallkaitsekest; *e* — klaasisolaa-  
laator; *f* — metall-leheke; *g* — tinakiht; *h* — välje-  
juhtmed.

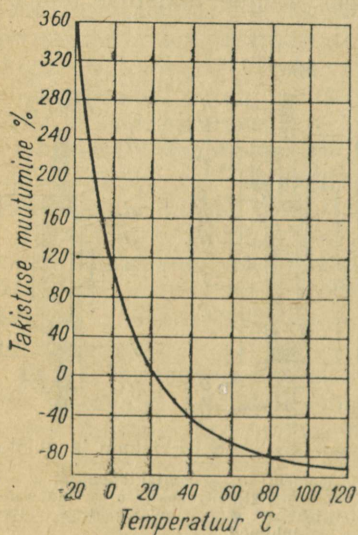
ratuuritegur *a* on umbes 3% ühe Celsiuse kraadi kohta. Joonisel 44 on kujutatud kõver, mis näitab termotakisti oomilise takistuse muutumist protsentides sõltuvalt temperatuurist. Diagrammis on takistuse algväärtuseks võetud termotakisti takistus temperatuuril  $20^{\circ}\text{C}$ .

Kirjeldatavad kolm termotakistitüüpi võivad töötada temperatuurivahemikus  $-100$  kuni  $+120^{\circ}\text{C}$ . Nende ülekuumutamine on lubamatu.

Kõik ülalnimetatud termotakistid on ühtlasi ka väga stabiilsed, s. t. säilitavad oma «külm takistuse» praktiliselt muutumatuna. MMT-tüüpi termotakistite suur stabiilsus tingib nende pika tööea, mis nagu passis märgitud, «on normaalse töörežiimi puhul praktiliselt piiramatu». MMT-tüüpi termotakistite mehaaniline tugevus on hea.

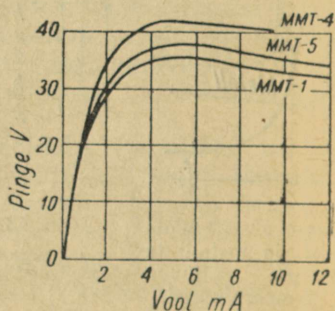
Joonis 45 kujutab termotakistite volt-amper-karakteristikuid, mis on saadud staatilisel režiimil ja väliskeskonna temperatuuril  $20^{\circ}\text{C}$ .

Peale käsitletud termotakistitüüpide on laialdaselt levinud veel TOC-tüüpi termotakistid. Konstruktiivselt on nad kujundatud 1 mm paksuste ja umbes 4 mm läbimõõduga tabletikestena. Väljed on moodustatud tableti külgedesse sissemonteeritud juhtmetest.



Joon. 44. MMT-tüüpi termotakisti takistuse sõltuvus temperatuurist.

Mõõtetermotakistid, mida meie tööstus toodab markide T8Д, T8С ja T9 all, on suhteliselt väikese termilise inertsiaga. Nende ehitus on järgmine. Pooljuhtivast ainest valmistatud väikese kuulikese kül-



Joon. 45. Termotakistite volt-ampere-karakteristikud.

ge kinnitatakse volframist väljed. Väljetega varustatud kuulike asetatakse väiksesse klaasballooni, mille diameeter on 3, ja pikkus 7 kuni 9 mm. Ballooni otstes on joodetud jämedamad traadid, mis ühendatakse kindlalt volframtraadikestega, mis seega on termotakisti väljejuhtmeteks.

ТП2/0,5, ТП2/2 ja ТП2/6-tüüpi termotakistid valmistatakse nii otsese kui ka kaudse kuumendusega. Nad kujundatakse peene niidina, mis on kinnitatud kahe volframist välje otsa. Viimased ühendatakse elektripunkti keevitusega kahe traadikese — nn. traaversite külge. Traaversid omakorda pressitakse vastava klaasjala sisse. Seepeale asetatakse kogu süsteem klaaskolbi.

Analoogilise konstruktsiooniga, kuid kaudse kuumendu-

sega termotakistid varustatakse lisaks veel kuumendus-spiraaliga, mis mähitakse termotakisti kerele. Viimane isoleeritakse spiraalist õhukese kvartstorukese abil. Säärastel termotakistitel on väljete arv kahe võrra suurem.

Rea ülesannete lahendamiseks vajatakse võimalikult väikse inertsi ja väikeste mõõdetega termotakisteid. Nii-suguste termotakistite valmistamise keerukat ülesannet õnnestus edukalt lahendada Leningradi Agrofüüsika Insti-tuudis, kus loodi mitu mikrotermotakistitüüpi «Игла» («Nõel»). Konstruktiivselt on need mikrotermotakistid kujundatud järgmiselt. Pooljuhile antakse kuulikese kuju, läbimõõduga 5 kuni 50 mikronit. Kuulikesse monteeritakse kaks platinatraadist elektroodi. Pooljuhist kuulike koos oma elektroodidega on kaetud õhukese klaasikihiga. Vii-mase paksuseks on ainult 30—50 mikronit. Umbes 2,5 mm kaugusel kuulikese tsentrist ühendatakse platinatraadi-kesed punktkeevituse abil 50—100 mikroni paksuste nik-list valmistatud väljetega. Isoleerimise otstarbel on mõle-mad väljed asetatud klaassukka. Mikrotermotakisti klaas-kesta pikkus on sõltuvalt tüübist 3 kuni 100 millimeet-rit.

Käsitletud mikrotermotakisti konstruktsioonis on soo-justundlikuks elemendiks seega väike pooljuhist kuulikene, mis asub klaaskorpuse ühes otsas. Kuna kesta pikkus üle-tab kümneid, sadu ja isegi tuhandeid kordi kuulikese läbi-mõõdu, saigi see termotakisti tüüp nimeks «Nõel».

Käsitletud mikrotermotakistitel on väga väike inert-s, umbes 0,02 sekundit. Nad võivad töötada võrdlemisi suu-res temperatuurivahemikus, nimelt  $-70$  kuni  $+250^{\circ}\text{C}$ .

Mikrotermotakistite väikesed mõõted ja väike termiline inert-s on põhjuseks, miks neid laialdaselt kasutatakse mit-metes teaduse ja tehnika harudes. Ühendatuna Wheats-tone'i silla ühte harusse võimaldab mikrotermotakisti mõõta temperatuuri täpselt ja väga kiirelt. Säärase meeto-diga on näiteks paljudel taimedel määratud lehtede temperatuuri mitmesugustes olelustingimustes ja uuritud nende soojusevahetust väliskeskkonnaga. Mikrotermotakis-teid saab juhtida inimese veresoontesse või haigetesse organitesse raskesti kindlakstehtavate haiguste diagnoosi-miseks.

## TERMOTAKISTITE KASUTAMISEST

Termotakistite hulgalistest rakendamisvõimalustest on siinkohal lühikeste kirjeldustena toodud ainult mõned näited.

**Käivitusvoolude piiramine.** Teatavasti tuleb haruvoolu-elektrimootori käivitamisel suurendada voolu aegamööda. Tavaliselt kasutatakse selleks käivitusreostaati, mis mootori pöörlemiskiiruse suurenedes aeglaselt välja lülitatakse. Viimastel aastatel kasutatakse käivitusreostaadi asemel üha sagedamini mootori ankruringi ühendatud termotakistit. Mootori võrguga ühendamisel läbib vool ankrumähise ja seega ka termotakisti. Viimases eraldub soojus, mistõttu tema temperatuur tõuseb ja elektriline takistus väheneb. Takistuse vähenemine aga põhjustab voolu tugevnemist ja koos sellega ka mootori pöörlemiskiiruse suurenemist kuni normaalsele töörežiimile vastava pöörlemiskiiruseni. Endastmõistetavalt ei saa voolu tugevnemine kesta piiramatult, sest voolu piirab lõpuks vooluringi takistus. Kogu käivitumisprotsess kestab, sõltuvalt termotakisti tüübist, 30 kuni 180 sekundit.

Käsitletud juht on ühtlasi näiteks termotakisti suure termilise inertsit positiivsest küljest.

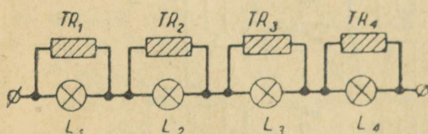
**Aegrelee.** Ülalkirjeldatud voolupiiraja lülitust kasutatakse teistes variantides kõige mitmekesisemate ülesannete lahendamiseks, kusjuures termotakisti täidab aegrelee funktsioone. Sageli kombineeritakse termotakisti elektromagnetilise releega, mis on seadise täidesaatvaks mehhanismiks. Termotakistiga aegrelee heaks omaduseks on asjaolu, et ta võib ühtviisi hästi töötada nii alalis- kui ka vahelduvvooluga.

**Temperatuurireostaat.** Voolu reguleerimise otstarbel asetatakse termotakisti ümber mõnedes lülitustes küttemähis, mida läbib vool. Olenevalt voolust kuumeneb mähis rohkem või vähem ja koos sellega ka termotakisti. Sünkroonselt termotakisti temperatuuri kõikumistega muutub tema vooluringis ka vool.

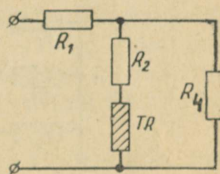
**Sunteeriv takisti.** Praktikas esineb küllalt sageli lülitusi, kus voolutarbijad on üksteisega järjestikku ühendatud. Säärase mooduse juures piisab ühe tarbija riknemisest, et kõikide ülejäänute töötamist katkestada. Niisuguse olukorra vältimiseks kasutatakse mõnikord termotakisteid.

Lihtsuse mõttes vaatleme lülitust, mis koosneb neljast

üksteisega järjestikku ühendatud hõõglambist ( $L_1$  kuni  $L_4$ ). Paralleelselt igale lambile on ühendatud küllalt suure oomilise takistusega termotakisti (joon. 46). Vooluringi läbiva voolu see osa, mis kulgeb läbi termotakistite, on nõrk, sest lampide takistus on termotakistite takistusest tunduvalt väiksem. Seetõttu eraldub termotakistites ainult vähesel hulgal soojust, mis hajub ümbritsevasse õhku, mistõttu nende temperatuur oluliselt ei tõuse. Oletame aga nüüd, et üks lampidest (näiteks  $L_2$ ) põles läbi. Esialgu koondub pingelang peamiselt läbipõlenud lambiga paral-



Joon. 46. Sunteerivate termotakistite skeem.



Joon. 47. Termotakisti pingestabilisaatori lülituses.

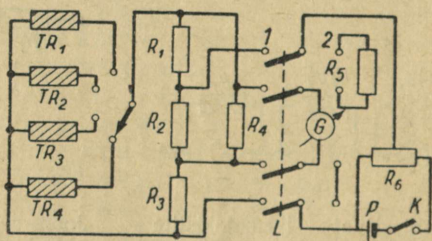
leelselt ühendatud termotakistile  $TR_2$ . Nimetatud termotakistit läbiv vool tugevneb ja tema temperatuur hakkab tõusma. Termotakisti kuumenemisel aga suureneb teda läbiva voolu tugevus pidevalt, kuni saavutab ligikaudu oma algväärtuse ja lambid hakkavad uuesti heledasti põlema.

Kirjeldatud seadise heaks töötamiseks tuleb ainult õigesti valida vooluringi lülitatavate termotakistite parameetrid.

**Pingestabilisaator.** Termotakisti kasutamisele rajatud pingestabilisaatori töötamispõhimõte selgub jooniselt 47. Termotakisti  $TR$  ühendatakse takistitega  $R_1$  ja  $R_2$  järjestikku. Elektrienergia tarbija  $R$  lülitatakse takistiga  $R_2$  ja termotakistiga paralleelselt. Võrgupinge tõusmisel tugevneb termotakistit läbiv vool, mis põhjustab tema temperatuuri tõusu ja takistuse vähenemist. Selle tulemuseks on pinge ümberjaotumine takistite  $R_1, R_2$  ja termotakisti  $TR$  vahel. Võrgupinge langemisel nõrgeneb termotakistit läbiv vool, mille tulemusel langeb tema temperatuur ja suureneb takistus. Kõik see põhjustab samuti pinge ümberjaotamist  $R_1, R_2$  ja termotakisti vahel. Viimase parameetrid valitakse nii, et pinge jääks tarbija klemmidel prakti-

liselt muutumatuks. Käsitletud juhul peab termotakisti termiline inerts olema minimaalne.

**Temperatuurimõõtja.** Termotakisteid kasutatakse laialdaselt temperatuuri mõõtmiseks. Ühe säärase seadme põhimõtteskeem on väga lihtne. Silla ühte harusse on ühendatud termotakisti, mida kasutatakse temperatuuri mõõtmiseks. Silla galvanomeeter gradueeritakse tavaliselt otse temperatuurikraadides. Mõõdetava temperatuuri muutumisel kaob sillas tasakaal ja galvanomeetri osuti kaldub vastavale poole, näidates temperatuuri muutust kraadides. Et



Joon. 48. Temperatuuri kaugmõõteseadme skeem.

kasutatava termotakisti oomiline takistus on küllalt suur, võib ühendusjuhtmete elektrilist takistust mitte arvestada ja temperatuure lugeda sadade meetrite kaugusel mõõteriistast.

Kasutades ülalkirjeldatud põhimõtet võib suure täpsusega mõõta nii õhu temperatuuri suurtel kõrgustel, kui ka vee ja pinnasõ temperatuuri suurtes sügavustes. Real juhitudel saab teostada temperatuuri kaugkontrolli. Kasutades üht ainust mõõteriista, võib temperatuuri mõõta mitmes kohas. Joonisel 48 on kujutatud säärase aparadi põhimõtteskeem. Aparaat ise asub kontrollpunktis, kuna termotakistid ( $TR_1$ ,  $TR_2$ ,  $TR_3$  jne.) on monteeritud esemetesse, millede temperatuuri mõõdetakse.

Aparadi temperatuuriskaala kontrollimiseks viiakse neljapooluseline ümberlüüti  $L$  asendist  $1$  asendisse  $2$ .

Käsitletud mõõtmismeetodi tundlikkus võib osutada väga suureks. Kasutades näiteks galvanomeetrit tundlikkusega  $2 \cdot 10^{-10}$  A/mm, saab määrata juba  $0,0005^\circ\text{C}$  suurust temperatuurimuutust. Ükski teine termomeeter ei saa pretendeerida niisugusele täpsusele. Seetõttu rakendatakse seda

meetodit veenisiseses termomeetrias ja teiste, veelgi peenemate mõõtmiste puhul.

**Temperatuuriregulaator.** Temperatuuri automaatseks reguleerimiseks asetatakse termotakisti termostaati, kus tuleb hoida püsivat temperatuuri, ja ühendatakse tundliku elektromagnetilise releega. Temperatuuri tõusmisel katkestab relee termostaadi küttemähise vooluringi. Pärast seda, kui temperatuur on langenud ettenähtud tasemele, lülitab relee termostaadi küttevoolu uuesti sisse.

**Bolomeetrid.** Bolomeeter on aparaat, mille abil saab suure täpsusega mõõta kiirgusenergiat. Bolomeetrite enamiku konstruktsiooni aluseks on võetud kiirgusenergia soojusenergiaks muundamise põhimõte. Pärast pooljuhtide elektriliste omaduste avastamist hakati neid ka bolomeetrias kasutama ja see tõstis bolomeetrite tundlikkust kuni  $10^{-10}$  vattini.

Kui suur on kaasaegsete bolomeetriliste seadmete tundlikkus, selle üle võib otsustada kas või järgmise näite alusel: teleskoobi fookusesse asetatud ja võimendajaga varustatud täpse bolomeetri abil on võimalik fikseerida kuu pinnalt peegeldunud soojuskiirgust.

Lähtudes ülaltoodust saab mõistetavaks bolomeetrite laialdane kasutamine kõige mitmekesisematel eesmärkidel. Spektromeetriliste uurimuste juures on neil aga otse erandlik väärtus.

Tavalise bolomeetri põhimõtteskeem kujutab endast silda, mille ühte haruse on ühendatud tundlik termotakisti. Kui viimasele langeb mingisugune soojuskiirgus, siis tõstab see tema temperatuuri, mille tagajärjel silla tasakaal kaob ja mõõteriista osuti kaldub vastavatesse ühikutesse graadueeritud skaalal teatava arvu jaotuste võrra nullasendist kõrvale. Sageli monteeritakse termotakisti klaasist või metallist vaakuumkesta, mis on varustatud mõnest läbi paistvast materjalist valmistatud aknakesega. Termotakisti väljejuhtmed tuuakse läbi kesta seina välja.

**Vaakuummeeter.** Hörenduse mõõtmiseks õhust tühjaks-pumbatavas ruumalades kasutatakse tänapäeval mitut liiki mõõteriistu. Neid mõõteriistu nimetatakse vaakuummeetriteks. Viimaste seas leidub ka niisuguseid, millede toimimispõhimõte on rajatud termotakisti omadustele. Väiksesse klaastorusse joodetakse niidikujuline termotakisti. See toru, mida nimetatakse manomeetriliseks lambiks, ühendatakse õhust tühjendatava ruumalaga. Seejärel lülitatakse

termotakisti silda, kus ta moodustab ühe haru. Silla teise harusse ühendatakse nn. ballastlamp. Viimase konstruktsioon on samasugune kui manomeetrilisel lambilgi, kuid ta on kõrgvaakuumini tühjaks pumbatud ja siis kinni joodetud. Silla kolmanda haru moodustab püsivtakisti ja neljanda — muudetav takisti, mille suurust saab vastavat nuppu pöörates reguleerida.

Sild on tasakaalus juhul, kui tühjendatavas ruumalas valitseb kõrgvaakuum. Vaakuumi halvenemisega väheneb järjest silla tasakaalustus ja galvanomeetri osuti liigub ikka kaugemale oma lähteasendist. Kuna galvanomeeter on gradueeritud otseselt elavhõbedasamba millimeetrites, siis näitab aparaaadi osuti tühjendatavas ruumalas valitsevat rõhku.

Silla tasakaal kaob vaakuumi muutudes seetõttu, et gaaside soojusjuhtivus sõltub teatavates piirides nende rõhust. Rõhu langemisel gaaside soojusjuhtivus väheneb. Kui sild on sisse lülitatud, läbib termotakistit vool. Termotakisti kuumeneb ja temas eralduv soojus siirdub ümbritsevasse keskkonda. Mida väiksem on gaasi rõhk, seda halvem on soojusjuhtivus ja seda vähem soojust antakse termotakisti poolt üle keskkonnale. Termotakisti soojuskadu, seega ka tema temperatuur, sõltub järelikult rõhust. Termotakisti temperatuuri muutudes muutub ka tema oomiline takistus, mis otsekohe mõjub silla tasakaalule. Termotakistit läbiv vool hoitakse vaakuummeetri töötamise ajal vastava reostaadi abil konstantsena.

Käsitletud vaakuummeetriga võib täie kindlusega mõõta rõhkusid piirides 1 kuni  $10^{-3}$  mm elavhõbedasammast. Rõhkudel, mis ületavad elavhõbedasamba ühte millimeetrit, ei sõltu gaasi soojusejuhtivus praktiliselt enam rõhust.

Vaakuummeetri manomeetrilisse lampi asetatud termotakisti peab olema võimalikult väikese inertsiga.

**Termotakistite teisi kasutusalasid.** Termotakisti omadustele rajatud aparaatide abil on võimalik mõõta vedelikkude ja gaaside voolamiskiirusi, kompenseerida vooluringide takistuse muutumist temperatuuri toimel, mõõta mitmesuguste elektriliinide võimsusi. Termotakisteid rakendatakse edukalt nii vedelikkude taseme kui ka soojusjuhtivuse mõõtmiseks määratud aparaatides ja seadmetes, mis reguleerivad pinget, heli tugevust ja teisi füüsikalisi suurusid.

Termotakisteid kasutatakse ka generaatorite amplituudi ja võimenduse automaatseks reguleerimiseks.

Laialdaselt on levinud üks eriliik termotakistite lülitusi — nn. piirajad, mille ülesandeks on mõne teatava füüsikalise suuruse, nagu voolu, pinget, heli tugevuse jne. tippväärtuse piiramine.

Kasutusel on ka eritüüpi gaasianalüsaatoreid, millede töötamise põhimõte on rajatud termotakistite omadustele.

## KUUES PEATÜKK

### TERMoeLEKTRIGENERAATOR ТГК-3

1953. aastal lasti välja maailma esimesed pooljuht-termoelektrigeneraatorid ТГК-3, mis 20-liinise petrooleumilambi «Молнија» poolt antava soojusenergia vahetult elektrienergiaks muundavad. ТГК-3 (mark on tuletatud venekeelse nimetuse «термоэлектрогенератор керосиновый» algtähtedest, number 3 tähistab generaatori võimsust vattides) on loodud Leningradi teaduslike töötajate kollektiivi poolt akadeemik A. F. Joffe juhendamisel. Tema ülesandeks on toita patareivastuvõjaid «Rodina-47», «Rodina-52», «Iskra», «Б-2» ja teisi sarnaseid.

Termoelektrigeneraatori ehituse põhimõte on rajatud termoelektrilise efekti ärakasutamisele. Selle efekti füüsikalist olemust käsitleti käesoleva raamatu esimeses peatükis. Seal näidati ka seda, et juhul, kui moodustada ahel kahest erineva juhtivusmehhanismiga pooljuhist, siis säärase paari termoelektromotoorse jõu tegur  $\alpha_0$  võrdub tegurite  $\alpha_-$  ja  $\alpha_+$  summaga ja paari otstel tekkiv kogu elektromotoorne jõud:

$$\varepsilon = \alpha_0(T_2 - T_1) = (\alpha_- + \alpha_+)(T_2 - T_1).$$

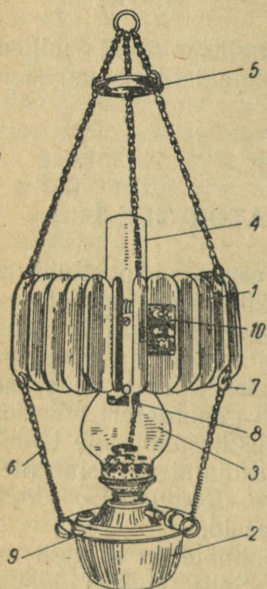
Eeltoodust järgneb, et paare üksteisega järjestikku ühendades võib sama temperatuurivahe juures saada suuremat koguelektromotoorset jõudu  $\varepsilon_n$ . Viimane väljendub järgmiselt:

$$\varepsilon_n = \alpha_0 n (T_2 - T_1),$$

kus  $n$  tähistab paaride arvu.

Teiselt poolt, ühendades paare üksteisega paralleelselt,

võib sama temperatuurivahe juures saada  $n$  korda tugevamat voolu, kusjuures  $n$  tähistab siin paralleelselt ühendatud paaride arvu. Selle põhimõtte järgi ongi ehitatud termoelektrigeneraator TTK-3. Teatav arv järjestikku



Joon. 49. Termoelektrigeneraatori TTK-3 välisvaade.

1 — termopea; 2 — petrooleumlamp; 3 — lambiklaas; 4 — metalltoru; 5 — termopea ülesriputamise ketikesed; 6 — petrooleumlambi ülesriputamise ketikesed; 7 — lahtivõetav ketike; 8 — riputusrõngas; 9 — klemmlaud.

ühendatud paare moodustavad esimese termopatarei, mille ülesandeks on lampide kütteringi toitmise. Teised, samuti järjestikku ühendatud paarid moodustavad teise termopatarei, mis vibraatormuundaja vahendusel toidab raadioaparaadi anood- ja võreringe. Generaatoris TTK-3 koosneb termopaar ühest metall- ja ühest pooljuhtharust.

Sisemisi jootekohti köetakse petrooleumlambi kuumade gaasidega, kuna välimisi jahutatakse toaõhuga. Et saavutada võimalikult suurt temperatuurivahet kõikides termopaarides, on välimised jootekohad ühendatud radiaatori 28 metalljahutusribiga.

Lambi põletile pannakse tavalise lambiklaasi asemele lühem klaas. Viimase avasse asetatakse kuumendi, mille ülemine osa lõpeb lambi põlemiseks vajalikku õhutõmbust tekitava metalltoruga (joon. 49). Termoelementid paiknevad radiaalselt ümber kuumendi nii, et nende välimised jootekohad on vastu radiaatori ribisid, sisemised aga vastu kuumendi pavalavat seina.

Säärase konstruktsiooniga petrooleumlamp täidab üheaegselt kaht ülesannet: valgustab ruumi ja kütab termoelektrigeneraatorit. Normaalselt põlevas lambis tõuseb termoelementide sisemiste jootekohtade temperatuur kuni umbes  $380^{\circ}\text{C}$ . Samal ajal ei ületa välimiste jootekohtade temperatuur  $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$ . See temperatuurivahe tagabki antud ülesande täitmiseks vajaliku termoelektromotoorse jõu.

Mõlema termopatarei väljejuhtmed on viidud klemmlaua viie klemmi alla. Kaks klemmi on ette nähtud vibraatormuundaja ühendamiseks ja ülejäänud kolm — raadiovastuvõtja kütteringide toitmiseks.

Tehase poolt kaasaantavas kirjelduses on termoelektrigeneraatori TFK-3 kohta toodud järgmised põhilised tehnilised näitajad:

1. Küttepatarei: a) raadiovastuvõtja «Rodina-47» jaoks —  $2V \pm 10\%$ , 0,5 A; b) raadiovastuvõtja «Rodina-52» jaoks — 1 kuni 1,4 V, 0,52 A; c) raadiovastuvõtja «Iskra» ja «Б-2» jaoks — 1 kuni 1,4 V, 0,3 A.

2. Anoodpatarei (koos vibraatormuundajaga): a) raadiovastuvõtja «Rodina-47» jaoks —  $120 V \pm 10\%$ , 8mA; b) raadiovastuvõtja «Rodina-52» jaoks —  $90 V \pm 10\%$ , 11 mA; c) raadiovastuvõtjate «Iskra» ja «Б-2» jaoks —  $90 V \pm 10\%$ , 11 mA.

3. Võre-eelpinge raadiovastuvõtjate «Rodina-52» ja «Iskra» jaoks on —  $9 V \pm 10\%$ .

Nagu selgub termoelektrigeneraatori TFK-3 kirjeldusest, toidab see mitut tüüpi raadiovastuvõtjaid, mis vajavad kütteks erinevaid voolusid ja erinevaid anoodpingeid. Säärane universaalsus on saavutatud kahel viisil. Erinevaid küttevoolusid saadakse patareist väljavõetud haruühendustest, mis täiel määral tagavad vajaliku tugevusega voolu saamist. Anoodpinge vajalikud väärtused saadakse seetõttu, et termoelektrigeneraatoril TFK-3 on langev volt-ampere-karakteristik. Anoodvoolu tugevnemisel langeb seetõttu vastavalt anoodpinge ja vastupidi.

Termoelektrigeneraatori TFK-3 kogukõrgus koos ülseriputamisseadisega on 1 000 mm ja läbimõõt — 300 mm. Ta kaalub ilma vibraatormuundajata 8 kg. Viimane koos ühendusjuhtmetega kaalub 3 kg. ja tema mõõted on  $189 \times 132$  mm. Lambis olevast petrooleumivarust piisab 8-tunniseks vahetpidamatuks töötamiseks, kusjuures petrooleumikulu on 70 g tunnis.

Käesoleval ajal töötatakse välja generaatori teist mudelit, mis tagab kütte-, anood- ja võreahelate toite ilma vibraatormuundajata. Vajalikke pingeid — nii madalaid kui ka kõrgeid — annab generaator ise.

SOOJUSE JA KÜLMA TERMOELEKTRILISEST  
TOOTMISEST

Külma võib Peltier' efekti rakendades toota ainult pooljuhtide abil.

Peltier' efekt leidis esimest praktilist rakendamist just kodustes termoelektrilistes külmutuskappides. Termoelektrilise külmutusseadme (teise nimetusega krüostaadi) ehitus ei erine oma põhimõttelt kuigi palju termoelektrigeneraatori ehitusest. Nagu termoelektrigeneraatori puhulgi, nii on ka siin tarvis sääraseid materjale, millel oleks maksimaalne elektrijuhtivus ja termoelektromotoorse jõu tegur ning minimaalne soojusjuhtivus. Säärastest materjalidest valmistatakse elemendid, mis koondatakse termosammastesse. Sambas ühendatakse kõik elemendid üksteisega järjestikku nii, et elektronelement moodustaks kontakti auk-  
elemendiga, viimane omakorda järgmise elektronelemendiga jne. Sambakesi võib omavahel ühendada paralleelselt. Kõik «külmad» jootekohad paigutatakse külmutuskapi sisemusse. «Kuumad» jootekohad ühendatakse aga metallist jahutusribidega. Kui säärast süsteemi läbib vool vajalikus suunas, siis sisemised jootekohad jahenevad, välimised aga kuumenevad. Tänu jahutusribidele, mis soojust ümbritsevasse õhku hajutavad, võivad sobiva konstruktiivse lahenduse puhul välimised jootekohad püsida konstantsel temperatuuril  $T_1$ , mis ruumi temperatuuri veidi ületab. Sisemiste jootekohtade temperatuur  $T_2$  on aga ruumi temperatuurist madalam. Valides otstarbekalt termoelektriliste harude parameetrid, võib saavutada sisemiste jootekohtade temperatuuri tunduvat alanemist.

Termoelektrilistel külmutusseadmetel on rida hindamatuid eeliseid, milledest tähtsaimaks on nende pikk tööiga. Normaalses eksploatatsioonitingimustes ei rikne termoelektriline külmutusseade üldse. Pooljuhtide parameetrite ratsionaalse valiku korral on külmutusseadme kasutegur küllalt kõrge.

Peltier' efekti võib kasutada ka ruumide kütmiseks välisõhu soojusenergia arvel. Selleks tuleks ülalkirjeldatud termoelektrilises süsteemis muuta ainult elektrivoolu suunda. Tulemuseks oleks sisemiste jootekohtade kuumenemine ja välimiste jahenemine. Endastmõistetavalt peab selleks ots-

tarbeks olema ehitatud vastava konstruktsiooniga aparaat.

Vaatleme ahelat, mis koosneb kolmest pooljuhist. Esimene neist olgu elektron-, teine — auk- ja kolmas jälle elektronjuhtivusega. Teatava voolusuuna puhul olgu esimese jootekoha temperatuuriks  $T_1$  ja teisel —  $T_2$ . Olgu veel  $T_1 > T_2$ . Kui elektrivool läbib säärase süsteemi, siis eraldub esimeses jootekohas teatav soojusenergia  $Q_1$ , kuna teiselt jootekohalt võetakse ära soojusenergia  $Q_2$ . Energiad  $Q_1$  ja  $Q_2$  ei ole omavahel võrdsed. Erinevus on tingitud sellest, et Peltier' soojus on proportsionaalne jootekoha absoluutse temperatuuriga. Järelikult  $Q_1 > Q_2$  ja kuumas jootekohas eraldub energiat  $P = Q_1 - Q_2$  võrra rohkem kui seda külmalt jootekohalt ära võetakse. Energia ülejääk  $P$  tekib elektrenergia arvel.

Saab tõestada, et

$$\frac{P}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Olgu näiteks kuuma jootekoha temperatuur  $T_1 = 290^\circ \text{K}$  ja külma jootekoha temperatuur  $T_2 = 260^\circ \text{K}$ . Sel puhul  $\frac{P}{Q_1} \approx \frac{1}{10}$ . See tähendab, et kui näiteks ruumi temperatuur on  $17^\circ \text{C}$  ( $290^\circ \text{K}$ ), siis ainult üks kümnendik jootekohal eralduvast soojusenergiast on saadud elektrivoolu arvel, kuna üheksa kümnendikku ammendatakse välise, külma õhu energiavarudest. Toodud arvutusest järeldub, et ruumide termoelektriline kütmine osutub majanduslikult soodsaks. Meie arvutustes tuleks muide teha veel oluline parandus, kuna nad rajati eeldusele, et kõik termoelektrilises kütteseadmes esinevad füüsikalised protsessid on pööratavad. Tegelikuses esineb aga ka mittepööratavaid energiakadusid. Kuid isegi viimaseid arvesse võttes pakub ruumide termoelektriline kütmine vaieldamatut huvi.

## KAHEKSAS PEATÜKK

### AATOMIPATAREI

Säärane kõlav ja paljulubav nimetus kuulub väikesele seadmele, mille konstruktsioon on väga lähedane tõkkehikihiga fotoelemendi ehitusele. Aatomipatarei on üks vii-

maseid leiutusi pooljuhtide elektroonika alal. Teateid tema kohta hakkas teaduslikus perioodikas ilmuma 1954. aastal. Aatomipatarei on seade, mis annab elektrienergiat mõne radioaktiivse elemendi, näiteks radioaktiivse strontsiumi kiirguse arvel.

Strontsium on Mendelejevi perioodilise süsteemi II rühmas paiknev keemiline element. Tema järjekorranumber on 38 ja aatomkaal — 87,63. Strontsiumi levik looduses ei ole suur — ta moodustab ainult 0,008% maakera koore aatomite koguhulgast. Tavaliselt esineb strontsium mitte vaba keemilise elemendina, vaid sulfaadina ( $\text{SrSO}_4$ ) või karbonaadina ( $\text{SrCO}_3$ ). Need mõlemad ühendid on mineraalid. Esimest neist nimetatakse tselestiiniks ja teist — strontsianiidiks.

Strontsium sulab  $770^\circ\text{C}$  juures. Tema erikaal on  $2,6\text{ g/cm}^3$ . Strontsium nagu tema rühma naabrid (kaltsium ja baarium) on väga aktiivne, hapendub õhu käes kaunis kiiresti, ühineb paljude keemiliste elementidega ja reageerib ka veega. Säärasel «tavalisel» strontsiumil pole mingeid radioaktiivseid omadusi. Kuid nagu paljudel teistelgi perioodilise süsteemi elementidel, on ka strontsiumil mitu isotoopi. Meenutame, et isotoopideks nimetatakse keemilisi elemente, millel on praktiliselt identsed keemilised omadused, kuid mis teineteisest erinevad aatomkaalu poolest. Pääegu igal perioodilise süsteemi elemendil on oma isotoobid. Näiteks perioodilise süsteemi II rühma kuuluval magneesiumil, mille aatomkaal on 24,32, on kolm isotoopi: neist esimesel on aatomkaal 23,99, teisel — 24,99 ja kolmandal — 25,99. VIII rühma elemendil nikkil on viis isotoopi, aatomkaaludega 57,96, 59,95, 60,95, 61,95 ja 63,95. Elavhõbedal on seitse, tinal — 10 isotoopi jne. Veel rohkem isotoope on radioaktiivsetel elementidel. Viimaste hulka on muidugi arvatud ka tehislilikud radioaktiivsed elemendid, millede puhul radioaktiivsus tekib pärast stabiilsete tuumade spetsiaalset töötlemist.

Tehislিকে radioaktiivsete elementide ritta kuulub ka radioaktiivne strontsium, millel on 10 isotoopi. Üks neist isotoopidest, aatomkaaluga 90, nn. strontsium 90, kiirgab radioaktiivsel lagundumisel  $\beta$ -kiiri, s. t. elektrone. Iseloomustav ja ühtlasi ka väga tähtis on asjaolu, et strontsium 90 poolt kiiratud elektronid liiguvad suure kiirusega, s. t. omavad suurt kineetilist energiat. Lisaks sellele on oluline tähtsus ka strontsium 90 poolestusperioodil, mis võrdub

25 aastaga. Selle aja jooksul lagundub pool radioaktiivse strontsiumi esialgsest kogusest.

Strontsium 90 ülaltoodud omadused võimaldasidki teda kasutada aatomipatareis.

Käsitleme alljärgnevas aatomipatarei ehitust.

Räni monokristallist valmistatud väikest plaadikest, mis viiakse heasse elektrilisse kontakti metallelektroodiga, töödeldakse spetsiaalselt selliselt, et monokristalli ühes osas tekiks elektron- ja teises — aukjuhtivusega räni. Sel teel saadakse kolm kihti, mis paiknevad järjekorras: aukräni — elektronräni — metallelektrood. Monokristalli aukjuhtivusega räni kontakt elektronjuhtivusega räniga, s. t.  $p-n$ -siire, põhjustab tõkkekihi tekkimist. Pole raske märgata, et käsitletava seadme ehitus ei erine seni põhimõtteliselt millegagi ventiil-fotoelementide, eriti «päikesepatarei» ehitusest. Kuid aatomipatareil on siiski oma iseärasus, mis teda ventiil-fotoelementidest eraldab. Selleks iseärasuseks on radioaktiivse strontsium 90 õhuke kiht, millega kaetakse räni monokristalli vaba pind. Strontsiumikihile kantakse veel välja ülesannet täitev kontaktelektrood.

Strontsiumi poolt kiiratavad elektronid tungivad räni-plaadikese sisemusse ja põhjustavad selles juhtivuselektronide tekkimist. Iga strontsiumi poolt kiiratud «elektronmürsk» tekitab ränis 200 000 sekundaarset, väiksema energiaga juhtivuselektroni, mis difundeeruvad ühele elektroodidest. Selle tagajärjel tekib seadme kahe elektroodi vahel potentsiaalivahe, mis tõuseb kuni 0,2 voldini. 0,32 cm<sup>2</sup> suure pinnaga ränielemendi lühisvool on 5  $\mu$ A, patarei kasutegur — 1%. Kuid on alust oletada, et kasutegurit on võimalik tunduvalt tõsta. Tänu strontsium 90 pikale poolestusperioodile loetakse aatomipatarei tööeks vähemalt 20 aastat.

Üksteisega järjestikku ja paralleelselt ühendatud mitu räniplaati moodustavad patarei. Viimast saab edukalt kasutada väikse võimsusega pooljuhtdiodide ja -trioididega varustatud raadiotehniliste seadmete ja teiste elektriparaatide toitmiseks.

Lihntne on märgata, et aatomipatareis tekkivate nähtuste iseloom on analoogiline ükskõik missuguses ventiil-fotoelementis esinevate nähete iseloomuga. Fotoelement erineb aatomipatareist üldiselt sellega, et temas kiiritatakse pooljuhti footonitega, kuna aatomipatareis toimub kiiritamine elektronidega.

Pärast seda, kui aatomipatarei kasutegurit õnnestub suurendada, laienevad tema rakendamisvõimalused tunduvalt.

### KOKKUVÖTE

Käesoleva brošüüri põhiteema ei ole eespooltooduga täiesti ammendatud, sest et osa, mida pooljuhid etendavad tänapäeva teaduses ja tehnikas, on tunduvalt suurem. Meenutame lugejale, et raadiolampide liitkatodid valmistatakse pooljuhtivatest ainetest.

Elektrikõrgepingeliine kaitstakse liigpingete eest, mida võivad esile kutsuda näiteks atmosfäärilised lahendused, pooljuhtidest valmistatud spetsiaalsete lahendajatega.

Materjalides esinevate pingete ja deformatsioonide määramiseks kasutatakse pooljuht-tensomeetreid, mis kujutavad endast kahe elektroodi vahele kinnitatud masstakisteid. Tensomeetrile mõjuva koormuse muutmisel muutub ka tema takistus.

Tuumatehnikas kasutatakse viimastel aastatel edukalt pooljuhtide baasil valmistatud elementaarosakeste loendajaid. Tehnikas leiavad laialdast rakendamist nn. senjettelektrikud, s. o. pooljuhtivad ühendid, millel on väga suur, mõningail juhtudel mitme tuhandeni ulatuv dielektriline läbitavus.

Baariumtitanaadi ( $\text{BaTiO}_3$ , Curie-täpiga üle  $100^\circ\text{C}$ ) senjettelektrilised omadused, mis avastati nõukogude füüsiku B. M. Vul'i poolt, laiendasid tunduvalt kondensaatorite valmistamiseks kasutatavate senjettelektrikute rakendamise võimalusi.

Veel suurema tähtsuse (peamiselt raadiotehnikas) saavutasid viimastel aastatel ferromagnetilised pooljuhtivad materjalid — ferriidid. Oma omaduste tõttu võivad need real juhtudel edukalt asendada teisi tänapäeval kasutatavaid ferromagnetilisi materjale, eeskätt terast. Vaatleme, mis toimub ferromagnetilise materjaliga, kui see satub magnetvälja.

Teatavate metallide ja sulamite ferromagnetismi seletab kaasaegne füüsika sellega, et ferromagnetis esineb tohutul hulgal mikroskoopiliste mөөdetega alasid, mis kõik on magneeditud ja omavad seetõttu teatavat, ruumiliselt orienteeritud magnetilist momenti. Temperatuuridel, mis ületavad Curie-täpi, lakkab spontaanne magneetumine.

Sääraste alade lineaarsed mõõted on pehme raua puhul  $10^{-4}$  cm piirides. Kui väline magnetväli puudub, siis on spontaanselt magneeditud alade magnetilised momendid juhusliku orientatsiooniga. Kui aga ferromagnet satub välisesse magnetvälja, siis püüab viimane käsitletavaid alasid orienteerida nii, et nende magnetilised momendid oleksid suunatud piki välist magnetvälja. Temperatuuri tõustes kasvab termiline liikumine ja välisele magnetväljale muutub spontaanselt magneeditud alade magnetiliste momentide korrapäramine raskemaks. Vastupidi, temperatuuri langedes see ülesanne kergeneb.

Ferromagnetiliste ainete magneetimisel kaasub spontaanselt magneeditud alade magneetumissuuna muutumisega omapärane «hõõrdumine». Seetõttu kuumeneb muutavas välismagnetväljas viibiv ferromagnetiline metall tunduvalt, põhjustades asjatut energiakadu. Ferromagnetilise metalli kuumenemist kutsuvad esile ka metallis indutseeritud Foucault' ehk pöörivoolud. Viimased on seda tugevamad, mida suurem on metalli elektrijuhtivus ja mida kõrgem on vahelduva magnetvälja sagedus. Meenutame, et just see efekt on aluseks võetud kõrgsagedusinduktsioonahjude ehitamisel.

Kui valmistada transformaatori südamik ühest rauatükist, siis kuumeneks see transformaatori töötamisel tugevasti.

Pöörivoolude vastu võitlemiseks tuntakse mitut moodust. Üheks levinuimaks nende seas on järgmine: transformaatori südamikud valmistatakse suhteliselt õhukestest, üksteisest isoleeritud raudplekkidest. Teine moodus põhineb magnetdielektrikust, s. o. isoleeriva massiga segatud ja kokkupressitud rauapulbrist südamiku kasutamisel.

Kuid need moodused ei ole ratsionaalsed raadiotehnikas kasutatavatel kõrgetel sagedustel. Seetõttu on kõrgete sageduste puhul laialdast kasutamist leidnud pooljuhtivad ferromagnetilised materjalid — ferriidid. Osutus, et pooljuhtide seas esineb aineid, millel on väga väike elektriline erijuhtivus ja seejuures head magnetilised omadused. Transformaatori ferriitsüdamikus, millel on suur oomiline takistus, osutuvad pöörivooludega seotud kaod väga väikesteks.

Pooljuhtide osatähtsusest ja arenguperspektiivides rääkis väga ilmekalt oma 1. jaanuaril 1955. a. peetud uueaasta-raadiokõnes akadeemik A. F. Joffe, öeldes:

«Tehnika suurimad saavutused kasvavad välja füüsikas tehtud avastustest. Popovi poolt leiutatud raadio näiteks on elektromagnetiliste lainete teooria järelduseks; elektrimasinad rajanevad elektromagnetilise induktiooni avastamisel, televisioon — füüsikalisel elektroonikal, tuumaenergia — aatomituuma füüsikal.

Tänase päeva füüsikal rajanevad homse tehnika võrsed.

Kaasaegne füüsika tunneb kaht ala, milledele me ootame suurimaid edusamme inimkonna materiaalsete elutingimuste parandamisel — need on aatomituuma ja pooljuhtide füüsika. Püüame veidi kergitada selle eesriide nurgakest, mis katab pooljuhtide tulevikku.

25 aastat tagasi hakati elektrotehnikas esmakordselt metallide kõrval kasutama ka pooljuhte. Tol ajal, esimese viisaastaku koidikul, ma avaldasin arvamust, et pooljuhtidest valmistatud termo- ja fotoelemendid suudavad kunagi muundada 3—4% soojuse- ja päikeseenergiast vahetult elektrienergiaks ja et rahvamajanduse sotsialistlik süsteem loob nende väljatöötamiseks vajalikud tingimused.

Paljudele näis see tookord fantastikana. Isegi mõned ajalehed kirjutasid sellest skeptiliselt. Praegu on need ootused aga praktika poolt juba ületatud, ja ma tahaksin ära märkida edasist etappi pooljuhtide juurdumisel meie olustikku ja rahvamajandusse. Selle etapi reaalsus tagatakse meie jõudude tormilise kasvuga kommunismile viival teel.

Ennetame mõttes mõned aastad või koguni üks-kaks aastakümnet ja me näeme, et pooljuhtidest termoelemendid varustavad tööstust elektrienergiaga, mis on saadud ilma masinate vahenduseta — otse koldesoojusest.

Meie elamute keskküte annab tasuta kõrvalsaadusena elektrienergiat sääraustes kogustes, mis lubab kõikide olustikuliste tarviduste täielikku elektrifitseerimist.

Kuid hiljem loovutab keskküte oma koha termoelektripatareidele, mis annavad talvel sooja ja suvel külma õhku, automaatselt hoides ruumides valitseva temperatuuri soovitud tasemel.

Kõik transpordiliigid — raudtee-, auto- ja veetransport, kuid võib-olla et isegi lennuasjandus lähevad üle termoelementidest saadud elektrienergiale.

Mendelejevi maa-aluse gasifitseerimise idee leiab oma loomuliku lahenduse termoelementides.

Samad pooljuht-termoelementid valmistavad külma nii kodustes külmutusseadmetes kui ka kiirestiriknevate produktide transportimisel ning säilitamisel.

Kõikjal, kas looduses või tööstuses, kus esineb soojuseallikaid, hakkavad need tootma elektrienergiat. Kõikjal, kus on elektrienergia, saab tekitada sooja ja külma, saab teostada igasuguseid tööstuslikke protsesse. Linnades ja maal saabub täieliku elektrifitseerimise ajajärk. Elektrienergia tootmine ei nõua enam keerukaid ja kalleid masinaid.

Kõikide maakeral esinevate energialiikide allikaks on päikesekiired. Kuid millisel keerukal ja ebatäiuslikul viisil me saame seda kasutada.

Päikesekiirte abil seovad taimed süsihapet õhust ja pinnasest. Kuid ainult umbes 1% päikeseenergiast säilib fotosünteesi protsessis ja salvestub puudes, kivisöes, turvas või naftas. Puu vajab 50, turvas tuhandeid ja kivisüsi miljoneid aastaid enne kui nad võivad anda meie tehastele soojust, mis aurukatelde kolletes läheb üle auru energiaks, muundub seejärel pöörlevate turbiinide mehaaniliseks energiaks ja alles lõpuks elektrienergiaks.

Pooljuhid suudavad päikese kiirtest ammutada 10—20 korda enam energiat kui taimed ja anda seda vahetult elektrivoolu näol. Kui õnnestuks katta kas või tuhat hektarit lõunamaiseid kõrbeid foto- või termoelementidega, siis annaks see meie käsutusse päevast päeva üks miljon kilovatti võimsust — seega rohkem kui Dneproges. Ja sääraseid, põllumajanduseks kõlbmatuid alasid on lõunas miljoneid hektare.

Tuumaenergia kasutamisel jääb tootmisjäätmelena üle radioaktiivseid aineid, mis aastate kaupa kiirgavad mitmesuguseid kiiri. Pooljuhid võimaldavad nende kiirte energiat muundada elektrienergiaks.

Kast, mille mõõted ei ületa üht meetrit, võib aastaid anda energiat valgustuseks, mootorite toiteks, akumulaatorite laadimiseks, raadioseadmete töötamiseks.

Pooljuhtide abil võib sadu kordi vähendada kõikide raadiotehniliste üksikosade, sealhulgas ka raadiolampide mõõteid. Raadiolambid asendatakse tulevikus ja juba nüüdki pooljuhtseadistega. Säärane, väikest kivikest meenutav seadis, mille mõõted ulatuvad mõne millimeetrini, alaldab

vahelduvvoolu, võimendab ja genereerib raadiolaineid. Ta vajab 10 korda vähem elektrienergiat. Mitmelambilist raadiovastuvõtjat saab mahutada käekella kesta.

Pooljuht-raadiojaamad ja -fotoelemendid võimaldavad kaugelt juhtida ka iga liigi liiklusvahendite liikumist või keerukaimat tootmisprotsessi, võimaldavad peaaegu silmapilkselt vältida avariide ohtlikke tagajärgi ja tehnoloogilise protsessi rikkumist.

Juba praegu teostavad pooljuhid reas tööstusharudes kontrolli ja tagavad täieliku automatiseerimise. Tulevikus vabastavad nad töölisi kõige väsitavamatest ja kiiresti kulgevatest operatsioonidest ning teevad töölise juhtijaks, kes jälgib ja kontrollib tootmisprotsessi.

Masinate ja tööriistade töö kõikide aspektide automaatne üleskirjutamine nii tööstuses kui ka põllumajanduses, tingimuste registreerimine, millistes toimub töö, — see haarab inimese tegevuse kõiki alasid.

Kuid milliseid teadusliku uurimise perspektiive avavad pooljuhid: peenimad nähted üksikutes molekulides, elektronide ja tuumaosakeste loendamine, ainult miljondiksekundeid kestvad protsessid — kõik see muutub uurijale kättesaadavaks. Sääraste vahenditega varustatud teadus tungib sügavamale looduse saladustesse ja avastab meile senitundmatuid tehnilise progressi vahendeid, mis jätavad kaugele maha kaasaegse teaduse eesliini — pooljuhid.»

Meie maa silmapaistva teadlase kõikides nendes sõnades tundub veel palju fantastilist. Kuid juba teaduse ja tehnika praeguse taseme juures võib põhjendatult rääkida pooljuhtide elektroonika kolossaalsetest perspektiividest. Kõige kainem ja ettevaatlikum, juba olemasolevatele saavutustele rajatud analüüs lubab kindlasti loota pooljuhte käsitlevate edasiste teadmiste kiiret progressi.

---

## KIRJANDUS

- А. Ф. Иоффе, Полупроводники, Изд. АН СССР, 1955.
- Н. Я. Пумпер, Кристаллические диоды и триоды, Госэнергоиздат, 1953.
- А. Я. Федотов, Кристаллические триоды, Госэнергоиздат, 1955.
- Г. Хениш, Полупроводниковые выпрямители, ИЛ, 1951.
- В. Г. Комар, Работа полупроводниковых выпрямителей в цепях управления, Госэнергоиздат, 1952.
- В. Г. Комар, Селеновые выпрямители, «Электричество», 1947, № 2. Полупроводниковые электронные приборы (сборник переводов под редакцией А. В. Русанова), ИЛ, 1953.
- В. С. Вавилов, Усиление токов высокой частоты кристаллическими германиевыми триодами, «Успехи физических наук», 1950, т. 40, вып. 1.
- Б. Т. Коломийц, Фотосопротивления, Изд. «Знание», 1954.
- Н. О. Чечик, Фотоэлементы и их применение, Госэнергоиздат, 1955.
-

## SISUKORD

	Lk.
Sissejuhatus . . . . .	3
<b>Esimene peatükk. Pooljuhtide elektrilised omadused</b>	
Kristallvõre . . . . .	5
Kristallide elektrijuhtivus . . . . .	9
Elektron- ja aukjuhtivus . . . . .	14
Dissotsiatsioonenergia . . . . .	20
Voolukandjate liikuvus . . . . .	21
Elektronide jaotus pooljuhtides energia järgi . . . . .	27
Väljumistöö . . . . .	30
Alaldamine . . . . .	33
Pooljuhtide termoelekter . . . . .	36
Peltier' efekt . . . . .	41
Fotojuhtivus . . . . .	42
Tõkkekihi-fotoefekt . . . . .	44
<b>Teine peatükk. Pooljuhtalaldajad ja -võimendajad</b>	
Seleenalaldajad . . . . .	48
Kuproksalaldajad . . . . .	52
Sulfiidalaldajad . . . . .	55
Pooljuhtdiodid . . . . .	57
Pooljuhttrioidid (transistorid) . . . . .	63
Pooljuhtseadiste kasutamisest . . . . .	71
<b>Kolmas peatükk. Fototakistid</b>	
Seleen-fototakistid . . . . .	72
Talofiidid . . . . .	76
Seatinasulfiid-fototakistid . . . . .	77
Vismutsulfiid-fototakistid . . . . .	79
Kadmiumsulfiid-fototakistid . . . . .	81
<b>Neljas peatükk. Tõkkekihiga fotoelemendid</b>	
Seleen-fotoelemendid . . . . .	82
Talliumsulfiid-fotoelemendid . . . . .	86
Hõbesulfiid-fotoelemendid . . . . .	88
Päikesepatarei . . . . .	89
Kadmiumsulfiid-fotoelement . . . . .	92
Germaanium-fotodiodid . . . . .	93
Fototakistite ja fotoelementide kasutamisest . . . . .	94

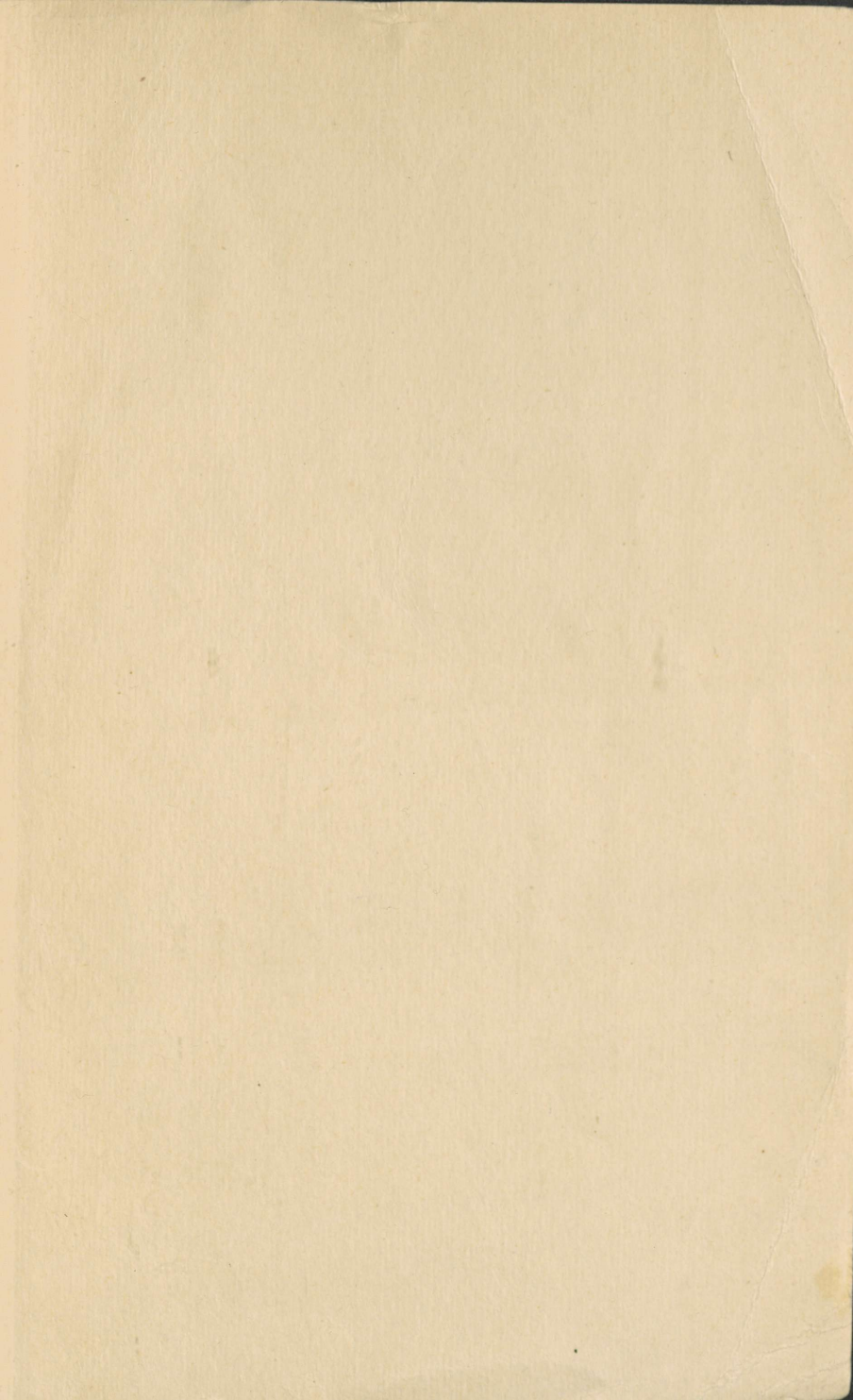
<b>Viies peatükk. Pooljuht-termotakistid</b>	
Töötamis põhimõte ja karakteristikud . . . . .	99
Termotakistite kasutamisest . . . . .	104
<b>Kuues peatükk. Termoelektrigeneraator ТКК-3</b>	109
<b>Seitsmes peatükk. Soojuse ja külma termoelektrilisest tootmisest</b>	112
<b>Kaheksas peatükk. Aatomipatarei</b>	113
Kokkuvõte . . . . .	116
Kirjandus . . . . .	121

---

М. С. Соминский  
ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ  
На эстонском языке.  
Эстонское Государственное Издательство  
Таллин, Пярну маантес 10.

\*

Toimetaja L. Abo  
Tehniline toimetaja L. Uuspõld  
Korrekторid L. Golberg ja E. Kask  
Ladumisele antud 3. VII 1956. Trükkimisele  
antud 21. IX 1956. Paber 54×84, 1/16. Trüki-  
poognaid 7,75. Formaadile 60×92 kohaldatud  
trükipoognaid 6,34. Arvutuspoognaid 6,91.  
Trükiarv 3000. Tellimise nr. 2368. Trükikoda  
«Tartu Kommunist», Tartu, Ülikooli 17/19.  
Hind rubl. 3.50



Rbl. 3.50

A-21193

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00365686 7