



I. PJATNOVA



POOL-
JUHTIDE
SADA
ELU-
KUTSET

2580/

I. PJATNOVA

POOLJUHTIDE SADA
ELUKUTSET

1
Eesti Kirjastus
1964

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1964

Originaali tiitel:

И. И. Пятнова

СТО ПРОФЕССИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Всесоюзного общества по распространению
политических и научных знаний
Москва 1962

Tõlkinud *H. Reinop*

Kaane kujundus *G. Pant*



SISSEJUHATUS

Vahel on meil raske tajuda, kui kiiresti areneb tehnika. Heidad aga pilgu tagasi, kas või mõne aasta võrragi, ning üllatud: oli see tõesti nii hiljaaegu?

1955. aasta lõpul toimus Moskvas pooljuhtseadistealane konverents. Vaheajal kogunes suur hulk inimesi mehe ümber, kes hoidis käes pleksiklaasist karpi, mis oma suuruselt ja kujult meenutas fotoaparaati FED. Seal, kus fotoaparaadil asetsevad nupud filmilindi kerimiseks, oli kaks ketast. Pöörad üht — kostab muusika või diktori hääl, puudutad teist — muutub heli tugevus.

See oli omatehtud pooljuhttraadio, mida vaatlesid huviga mitte korrespondendid ega mõne näituse külalastajad, vaid füüsikud ja insenerid — eriteadlased pooljuhtseadiste alal. Läbipaistvate seinte kaudu heitsid nad pilgu karbi sisemusse, silmitsesid vaimustusega montaaži ämblikuvõrku, imetlesid heli puhtust ja tugevust.

Raske uskuda, et see oli kõigest üheksa aastat tagasi. Niisugused vastuvõtjad — seejuures mitte omatehtud, vaid tehastes valmistatud — ei ole ammu enam harulduseks. Pooljuhtidega varustatakse raadioseadmed Maa tehiskaaslastel ja kosmoselaevadel. Raadiovestlused, mida pidasid kosmoses «tähevennad» Andrian Nikolajev ja Pavel Popovitš, on nõukogude elektroonika, esmajärjekorras pooljuhtide tehnika väljapaistvateks võitudeks.

Ka teistel teadusaladel on pooljuhtide abil küllaltki palju imetlusväärset saavutatud. Ja kõike seda niivõrd lühikese ajaga! Avastuste, uute tehniliste ideede ja lahenduste laviin, mille hulgas on ka selliseid, mida ei saa teostada ühegi muu vahendiga, — niisugune on pooljuhtide ajalugu meie päevil. Iga aasta avab nende ees üha

uusi teid, selgitab välja nende suurepärase materjalide uusi võimeid.

Selles brošüüris jutustatakse mõnedest kõige huvitavamatest suundadest pooljuhtide tehnikas. Kuid enne on vaja kas või õige lühidalt kõnelda pooljuhtide omadustest, siis saab selgeks nende seadmete töötamispõhimõte, milledest edaspidi juttu tuleb.

ELEKTRON, URVE JA KAHT LIIKI POOLJUHI

Teadlased täheldasid juba ammu, et mõned ained, mis elektrivoolu üldiselt halvasti juhtisid, muutusid soojendamisel või valgustamisel äkki elektrijuhtideks. Kuid tähelepanu neile avastustele peaaegu ei pööratud.

Noil aastail tunnustas elektrotehnika vaid kaht liiki aineid — juhid ja isolaatorid. Kõiki ülejäänud materjale — neid nimetati pooljuhtideks — peeti lihtsalt kõlbmatuiks. Aga see asjaolu, et mõned neist olid tundlikud soojuse ja valguse suhtes, üksnes halvendas olukorda: vähe sellest, et nad halvasti voolu juhivad, pealekauba muutub nende juhtivus ka veel!

Kuid just pooljuhtide tundlikkus välismõjude suhtes avaski neile tee tehnikasse. Selleks oli tarvis mõista ja selgitada nende materjalide iseärasusi. Seda aitasid teha tänapäeva füüsika edusammud.

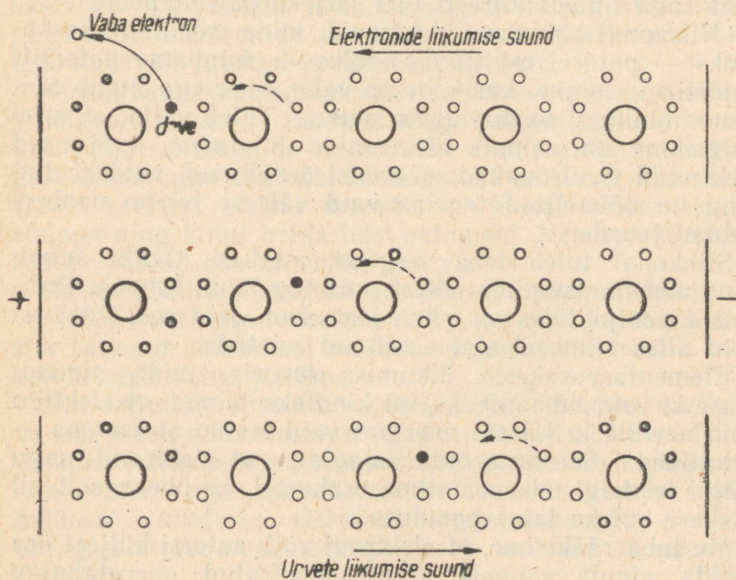
Miks juhib metall hästi voolu? Sellepärast, et temas leidub alati palju vabu elektrone. Mispärast dielektrik peaaegu üldse voolu ei juhi? Sellepärast, et temas on elektronid väga tugevasti seotud aatomitega. Pooljuht aga on vahepealse olukorras: ka temas on elektronid seotud aatomitega, kuid mitte nii tugevasti nagu dielektrikus, ja seepärast eralduvad nad mõne teguri mõjul ning muutuvad vabadeks.

Neid tegureid võib olla mitmesuguseid. Näiteks soojus. Iga aine osakesed, nagu teada, on alatises kaootilises liikumises. Pooljuhi aatomite võnkumisel võivad nendest eralduda elektronid. Mida kõrgem on keha temperatuur, seda suurem on osakeste soojusliikumise energia ja seda rohkem elektrone vabaneb aatomitest. Seepärast parendabki pooljuhi soojendamine tema elektrijuhtivust.

Mõned pooljuhid reageerivad samasugusel viisil valgusele. Valgus koosneb elementaarsetest «kiirgusannus-

test» — kvantidest ehk footonitest. Neelates sellise energiaportsjoni, rebib elektron end aatomist lahti. On tähtis märkida, et erinevate ainete puhul vajab elektron selleks erinevat ja seejuures rangelt kindlaksmääratud hulgal energiat. Seetõttu on ühed pooljuhid eriti tundlikud näiteks punase, teised rohelise valguse suhtes (erinevat värvi kiired koosnevad erineva energiaga footonitest). On aga valgus tõesti õnnestunult valitud, võib ta pooljuhi elektrijuhtivust vahel miljoneid kordi muuta!

Elektroni vabanemisel leiab pooljuhis aset kummaline ja seejuures väga oluline nähtus. Tuletage meelde, kuidas on ehitatud iga aatom: tuumal on positiivne, elektronidel negatiivne laeng, tervikuna aga on aatom neutraalne. Kui aatom kaotab ühe elektronidest, jääb osa tuuma laengust tasakaalustamata — aatom muutub positiivselt laetud iooniks. Pooljuhi (näiteks germaaniumi) kristallvõres paikneb iooni positiivne laeng just seal, kus



Germaaniumi kristallis on aatom ümbritsetud neljast naabrist. Sideme naaberaatomitega tagavad kaks elektroni — üks igast aatomist. Joonisel on näidatud, kuidas erinimelised laengud niisuguses kristallis liiguvad.

asus eraldunud elektron ja kuhu jäi «tühi koht». Kohta, mille elektron vabaks jättis, nimetatakse urbeks. Urve on elektronile omamoodi antipoodiks. Niipea kui pooljuhti ilmub vaba elektron, tekib üheaegselt niisama suur positiivne laeng — urve.

Tõsi küll, elektron on vaba, ent urve, nagu esimesel pilgul näib, on aatomiga seotud ega saa sellest eralduda. Kuid nii see ei ole. Urve võib samuti pooljuhhis liikuda. Ja kui pooljuht pingestada — ühendada patarei poolustega —, siis hakkavad vabad elektronid positiivse, urbed aga negatiivse pooluse suunas liikuma.

Kuidas see toimub? Kuidas võib üldse kõnelda «tühjade kohtade» liikumisest?

Kujutage endale ette järjekorda uut filmi linastava kino kassa ees. Esimene inimene järjekorras, kes seisis kassaluugi juures, ostis pileti ja lahkus. Mõneks silmapilguks jäi tema koht tühjaks, kuid siis asus sinna teine, teise järel kolmas jne. Igaüks astus sammu edasi, tühi koht aga nihkus kiiresti piki järjekorda tahapoole.

Niisamuti hakkavad elektronid, mida meelitab «kassaluuk» — patarei positiivne poolus —, hüppama aatomilt aatomile — sinna, kus koht on vaba, urve aga liigub seejuures muidugi vastupidises suunas. Tuleb välja, et urbe kulgemine on samuti elektronide liikumine, kuid need elektronid ei ole vabad, aatomist eraldunud, vaid seotud ning on võimelised tegema vaid väikese hüppe naaberaatomi juurde.

Siinkohal tuleb teha selgitav märkus. Õeldu annab üsna umbkaudse pildi sellest, mis tegelikult toimub. Protessid pooljuhtides on väga keerukad. Just seepärast on neid alles viimasel ajal suudetud seletada.

Elementaarosakeste liikumise teooria, mida nimetatakse kvantmehhaanikaks, on kindlaks teinud, et elektron võib neelata ja kiirata energiat vaid teatud annustena — kvantidena. See on seotud asjaoluga, et elektronil, nagu kõigil teistelgi mikromaailma osakestel, on üheaegselt nii osakese kui ka laine omadused.

Me juba rääkisime, et elektroni võib aatomi küljest ära rebida ainult rangelt kindlaksmääratud energiahulga abil. Seda väidet nimetatakse energia kvantiseerimise printsiibiks.

Elektronid paiknevad aatomis kihtidena — katetena. Katete arv sõltub aatomi asukohast Mendelejevi tabelis;

mida raskem on aatom, seda rohkem on temas katteid. Elektrone on igas kattes samuti täiesti kindlal hulgal.

Igale katele vastavad oma energiatasemed, millel võivad asuda elektronid. Nende tasemete vahekohtades elektrone olla ei saa. Nii paiknevad «lubatud» ja «keelatud» tasemed. Ühest «lubatud» tasemest teise võib elektron üle minna ainult hetkelise hüppe teel, kiirates või neelates seejuures vastava annuse energiat. See on otsene järeldus energia kvantiseerimise printsiibist.

Teine tähtis kvantide teooria poolt püstitatud postulaat on kvantseisundite kokkusobimatuse printsiip, mille järgi elektroni seisundit iseloomustavad peale energiavaru ka teised suurused. Me ei hakka nendel peatuma. Märgime vaid, et igas kvantseisundis võib asetseda ainult üks elektron. Siit järgneb, et kui aatomid ühinevad mingiks kehaks, näiteks kristalliks, mõjutavad nad üksteist. Elektronide kvantseisundid, mis üksikutes aatomites olid ühesugused, muutuvad nüüd mõnevõrra ja erinevad juba üksteisest. Füüsikud iseloomustavad niisugust nähtust järgmiselt: elektronide energiatasemed «lõhenevad» ning moodustavad lubatud ja keelatud tsoonid.

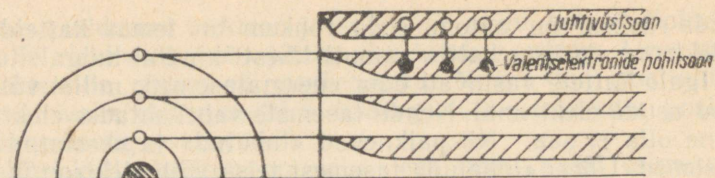
Nüüd vastab juba igale elektronkatele oma tsoon. Kõige huvitavam tsoon on tuumast kõige kaugemate, niinimetatud valentselektronide tsoon. Just nende elektronide hulgast sõltub aine üks põhilisi keemilisi omadusi — valents (ladinakeelsest sõnast *valentia* — jõud), võime siduda endaga ning kinni hoida teisi aatomeid. Needsamad elektronid võtavad osa ka elektrijuhtivusest.

Peale põhilise, lubatud tsooni on valentselektronidel veel üks, just nagu varutsoon. See on juhtivustsoon. Kui siia satuvad aatomitest eraldunud vabad elektronid, hakkab kristall voolu juhtima.

Kui kujutada mainitud kahte tsooni joonisel energiavarude näol, mida omavad nendes asuvad elektronid, siis paikneb juhtivustsoon loomulikult põhitsoonist kõrgemal, nende vahel aga asetseb keelatud tsoon. Viimase laius määrabki kindlaks elektroni ergastusenergia — selle energiaannuse, mille elektron peab neelama, et aatomist eralduda.

Niisiis, kui vabad elektronid liiguvad juhtivustsoonis, kulgevad urbed põhitsoonis. See on pooljuhtide «tsooni-teooria» lähtealus.

Esitame kahe mainitud tsooni lihtsaima, kõige kasutata-



Elektronide energiatasemed aatomis ja tsoonid kristallis.

vama mudeli. Kujutage endale ette kahekorruselist garaaži. Alumine korrus on põhitsoon, ülemine korrus — juhtivustsoon. Esimese korruse lae ja teise korruse põranda vaheline piirkond on keelatud tsoon.

Olgu kogu alumine korrus täis autosid, üleval aga mitte ühtegi. Teiste sõnadega — juhtivustsoonis ei ole ühtki elektroni.

Nüüd võtame ühe auto ja paigutame ülemisele korrusele. Alumisele korrusele jääb urve. Seejärel kallutame kogu garaaži — ühendame pooljuhiga patarei poolused. Kõik autod, niihästi esimesel kui ka teisel korrusel, veerevad alumisse serva — elektronid liikusid patarei positiivsele poolusele. Tühi koht esimesel korrusel aga nihkus loomulikult ülemisse serva — urve siirdus negatiivsele poolusele.

Muidugi on see väga jäme analoogia, kuid aitab siiski mõista, mispärast vabad ja seotud elektronid käituvad pooljuhis nii erinevalt: esimesed liiguvad nagu normaalsed negatiivselt laetud osakesed, teiste kulgemine aga avaldub nagu positiivsete laengute vastassuunaline liikumine. Nii tekivad pooljuhis kaks voolu — elektron- ja urvevool.

Kuid niisugust pilti võiks täheldada ainult ideaalses, absoluutselt puhtas, ilma igasuguste lisanditeta pooljuhis, milles vabade elektronide ja urvete arv on kogu aeg ühesugune. Tegelikult on pooljuhis alati lisandeid, mis kas meeeldi neelavad elektrone, jättes järele ainult urbeid, või vastupidi, toovad juurde liigseid elektrone, mis kiiresti urbed «täidavad». Kohtudes vaba elektron ja urve liituvad, ehk nagu öeldakse — rekombineeruvad, muutudes seotud elektroniks.

Lisandite mõju sõltub nende valentsist. Oletame, et pooljuht on germaanium. See on neljavalentne element (paikneb Mendelejevi tabeli neljandas rühmas), s. t. väli-

mises kattes on igal aatomil neli elektroni ning aatom on kristallis seotud nelja naaberaatomiga. Kui üks nendest aatomitest on asendatud viiendasse rühma kuuluva lisandi, näiteks fosfori aatomiga, millel on viis valents- elektroni, siis neli neist on vajalikud naabrite sidumiseks, viies aga osutub üleliigseks. Kolmevalentse aatomiga lisandil (alumiinium või boor) aga jääb üks elektron puudu ja ta püüab seda endale soetada. Seepärast annab fosfor vabade elektronide ülejäägi, boor aga, vastupidi, jätab järele vaid urbed.

Tuleb mainida, et germaanium on väga tundlik lisandite suhtes. Ühest võõrast aatomist pooljuhi miljardi aatomi kohta on küllalt, et järsult muuta tema elektrijuhtivust.

Lisandite energiatasemed paiknevad seal, kus pooljuhi enda elektrone olla ei saa, — keelatud tsoonis. Just seepärast eraldub fosfori elektron kergesti oma aatomist — tal on juhtivustsoon lausa «käega katsuda». Sellesama pärast tekitab boori aatom urbe — elektronid pooljuhi valentstsoonis satuvad väikseimagi tõuke puhul tema tugevasse embusse.

Niisiis on praktikas olemas pooljuhte, milles, jämedates joontes, on ainult mingid ühesugused voolukandjad — kas elektronid või urbed.

Kordame — jämedates joontes. Edaspidi tuleb sellesse väitesse teha parandus, kuid põhijoontes on see õige: reaalsel pooljuhtidel on kas elektron- või urvejuhtivus. Esimesi nimetatakse elektron-, teisi urvepooljuhtideks. Just nimetatud kaht liiki pooljuhid pakuvadki praktikale kõige huvitavamaid võimalusi.

Tõsi, mõnikord kasutatakse ainult mingit ühte liiki pooljuhti (kas elektron- või urvejuhtivusega), näiteks asendamatute seadistena automaaticas, mis tundlikult reageerivad kõige väiksematelegi temperatuuri kõikumistele (termotakistid ehk termistorid) või valguse intensiivsusele (fototakistid). Kuid suuremalt osalt rakendatakse praktikas just mõlemat liiki pooljuhtide kombinatsiooni.

Kui võtta tükk elektronpooljuhti ja soojendada selle üht otsa, siis siin soojusliikumise energia suureneb ja järelikult ilmub rohkem vabu elektrone. Need suunduvad külma otsa poole, mis omandab liigse negatiivse laengu.

Urvepooljuhis tekitab soojendamine liigseid urbeid, mis siirduvad külma otsa poole ja laevad selle positiiv-

selt. Kui kahe niisuguse tüki otsad kokku joota ja jootekohta soojendada, külmad otsad aga juhtmega ühendada, tekib juhtmes vool.

Nii saadaksegi termoelement — miniatuurne elektri-jaam, mis on võimeline soojust vahetult elektriks muutma. Tükkide kuumade otste külge joodetakse metallist ühendusplaat, külmadele otstele kinnitatakse aga galvanomeetri-ga ühendatud juhtmed.

Selline termoelement — pooljuhttermoelemendi erikuju — omab tähtsa eelise. Termistor vajab lisavooluallikat — seadis muudab üksnes oma takistust —, termoelement aga on autonoomne — ta tekitab ise voolu. Tõsi, tundlikkuse poolest jääb termoelement tavaliselt termistorist maha.

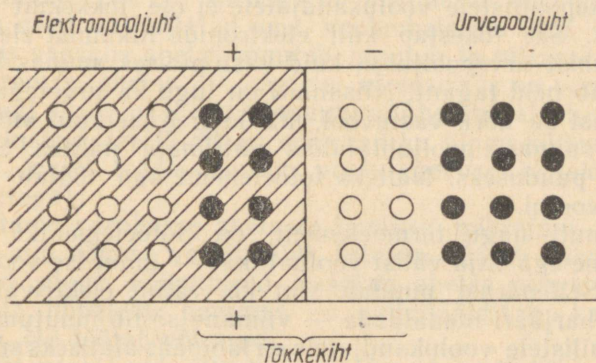
Hoopis tähtsam on aga asjaolu, et termoelemendid võivad olla energiaallikaiks. Selleks ühendatakse rida elemente termopatareiks, mis annab juba üsna märgatavat pinget.

Niisugune patarei võib täita ka vastupidist ülesannet: kui temast läbi lasta elektrivool, siis üks rühm jootekohti soojeneb, teine jahtub. Põhjust ei ole raske mõista: elektronid kõikides elektronpooljuhtides liiguvad plusspooluse, urbed kõikides urvepooljuhtides miinuspooluse poole. Tähendab, ühes jootekohtade rühmas nad kohtuvad, rekombineeruvad ja eraldavad soojuse kujul energiat, mis on kulutatud nende moodustamiseks, teises aga moodustuvad sel teel, et neelavad soojust ümbritsevast keskkonnast. Niisugusel nähtusel põhineb pooljuhtkülmutuskapide, -soojendite ja -termostaatide tegevus.

Kuid eriti huvitav tulemus saadakse kaht liiki pooljuhtide vahetul kokkupuutel. Kujutage endale ette kristalli, milles lisandid paiknevad nii, et üks osa kristallist on elektronjuhtivusega, teine — urvejuhtivusega. Vabu elektrone kristallis võib võrrelda gaasiosakestega, neid isegi nimetatakse elektrongaasiks. Anumasse suletud gaas püüab alati välja tungida — nii levib lõhnaõli lõhn terves toas, kui pudel on avatud. Kristalli elektroonne osa sarnaneb niisuguse pudeliga — siin on palju vabu elektrone, mis suunduvad urvejuhtivusega ossa, kus neid praktiliselt ei ole. Elektrone kaotanud elektronpooljuht omandab positiivse, urvepooljuht aga neid vastu võttes negatiivse laengu. Elektronidele vastu liiguvad urbed; seejuures urvepooljuht, kus neid vähemaks jääb, saab jällegi

negatiivse laengu, elektronpooljuht aga, kuhu neid juurde tuleb, uuesti positiivse laengu. Need laengud paigutuvad õhukesse kihti pooljuhtidevahelise piiri lähedal ja takistavad voolukandjate edasist liikumist. Negatiivne laeng urvepooljuhi pinnal tõukab vabu elektrone kristalli elektronroonse osa sügavusse. Positiivne laeng elektronpooljuhi pinnal tõukab urbeid vastassuunda.

Niisiis tekib erinevat liiki pooljuhtide piiril (seda nimetatakse elektron-urvesiirdeks) omapärane, äärmiselt õhuke tõkkekiht. See on barjäär, mida urbed ja elektronid ei suuda ületada.



Tõkkekiht kaht liiki pooljuhtide vahel.

Ühendame nüüd meie kristalli patareiga: elektronjuhtivusega osa positiivse, urvejuhtivusega osa negatiivse poolusega. Kuid elektronjuhtivusega osa oli juba positiivselt, urvejuhtivusega osa aga negatiivselt laetud. Tuleb välja, et väline elektriväli on samasuunaline sisemisega — tõkkekihi väljaga. Barjäär muutub veelgi kõrgemaks, voolu ei ole.

Lülitame patarei poolused ümber: plussi ühendame urvejuhtivusega, miinuse elektronjuhtivusega piirkonnaga. Väline elektriväli muudab barjääri madalamaks ja voolukandjad hüppavad vabalt üle elektron-urvesiirde.

Nagu näeme, laseb tõkkekiht voolu läbi ainult ühes suunas — meie kaksikpooljuht ei ole midagi muud kui voolu alaldi. Just nii ongi ehitatud pooljuht-jõualaldid (need muudavad vahelduvvoolu alalisvooluks) ja raadio- tehnikas kasutatavad detektorid.

Niisamasugusest elektron-urvepaarist koosnevad pooljuhtfotoelemendid, mis toodavad elektrit valgusest. Kuid selleks et mõista nende töötamist, tuleb teha üks selgitav märkus.

Mäletate, eespool oli mainitud, et reaalses pooljuhtides on, jämedates joontes, ainult mingisugused ühed voolukandjad — kas elektronid või urbed. See on väga jäme lähendus. Täpsemalt tuleb öelda nii: kõrvuti põhiliste voolukandjatega (elektronidega elektronpooljuhis, urvetega urvepooljuhis) leidub alati ka mittepõhilisi voolukandjaid. Muidugi on viimaseid märksa vähem.

Mittepõhilistele voolukandjatele ei ole tõkkekiht takistuseks. See tõkestab küll elektronide liikumist elektronpooljuhist urvepooljuhti, kuid vastupidises suunas hoopis ergutab neid tagant. Niisamuti on lugu ka urvetega. Sellepärast on nõrk vastuvool, mis kulgeb keelatud, «tõkestatud» suunas, pooljuhtalaldis vältimatu nähtus. See on alaldi puuduseks. Näiteks fotoelement aga töötab ainult vastuvoolul.

Samuti nagu termoelement, on fotoelementki autonoomne ega vaja välist vooluallikat — ta on ise vooluallikas. Sellepärast puudub siin ka väline elektriväli, mis võiks barjääri madaldada — viimane säilib muutumatuna ja põhilistele voolukandjatele on läbipääs alatiseks suletud. Seetõttu elektronide ja urvete paarid, mis tekivad kristalli valguse poole pööratud osas, lahknevad järgmiselt: põhilised voolukandjad jäävad paigale, mittepõhilised aga lähevad läbi barjääri. Selle tagajärjel tekib potentsiaalide vahe.

Niiviisi on ehitatud enamikule lugejaist hästi tuttav fotoeksponeerimise seade, mis määrab kindlaks fotoaparaadi objektiivile langeva valgusvoo suuruse.

Samasugustest fotoelementidest koosnevad päikesepatareid. Fotoelemente kasutatakse ka automaatikas, muidugi mitte energiaallikatena, vaid tundlike seadistena, mis reageerivad valgusele.

Ja lõpuks veel üks, võib-olla kõige tähtsam pooljuhtseadis — elektriliste võnkumiste võimendaja. See koosneb kolmest pooljuhtkihist — äärmised on üht, keskmine teist liiki pooljuht. Nende vahel moodustub kaks elektron-urvesiiret. Seadisega ühendatakse kaks patareid selliselt, et üks siiretest on lülitatud lubatud, teine tõkestatud suunas.

Oletame, et äärmised kihid on meil elektronjuhtivusega.

keskmine — urvejuhtivusega, kusjuures kõik kolm kihti paiknevad vertikaalselt. Alaku laengute liikumine vasakult. Siis osutuvad elektronid, mis edukalt läbisid vasaku siirde, keskmises, urvejuhtivusega kihis, mittepõhilisteks voolukandjateks ja ületavad samuti takistamatult parema siirde, kuigi see on suletud.

Veel üks tähtis küsimus: peaksid ju mittepõhilised voolukandjad kiiresti kaduma, nii et keskmist kihti läbib arvatavasti vaid väike osa nendest. See ei pea aga sugugi nii olema: keskmine kiht tehakse väga õhuke ja seetõttu vool peaaegu ei nõrgene.

Meenutame, et iga siirdega on ühendatud oma patarei, igaüks neist on lülitatud oma vooluahelasse. Kui voolutugevus vasakus ahelas muutub, muutub ta niisama palju ka paremas ahelas — nägime, et seadises on vool läbi kummagi siirde peaaegu ühesugune. Ahelate takistused on aga erinevad, järelikult on erinevad ka pinged kõikumised (pinge, nagu teada, võrdub voolutugevuse ja takistuse korrutisega).

Lülitame vasakusse ahelasse tavalise mikrofoni, paremasse aga võimsa valjuhääldi. Inimene räägib mikrofoni. Nõrgad pinged kõikumised vasakus ahelas peegelduvad tohutute hüpetena paremas — valjuhääldit on kaugele kuulda. Nii töötab võimendi.

Tuleb veel kord alla kriipsutada, et pooljuhtide omadusi, samuti nagu seadiste töötamispõhimõtteid, on siin kirjeldatud üsna skemaatilisel. Ent üksikasjalisem tutvumine nendega ei kuulu meie ülesande hulka.

Märgime veel, et tsooniteooria, mille alused on esitatud eespool, selgitab paljusid pooljuhtide iseärasusi. Kuid tänapäeval ei rahulda ka see teooria enam füüsikuid — on avastatud ja uuritud palju fakte, mis tsooniteooriaga kokku ei sobi. Uut, niisama harmoonilist teooriat veel ei ole, seepärast luuakse üksikute nähtuste eriteooriaid, mis täiendavad ja parandavad põhilist — tsooniteooriat. Aga teooria iga edusamm rikastab ka praktikat, näitab kätte uued teed pooljuhtide kasutamiseks.

ESIMESEST DETEKTORIST TRANSISTORINI

Esimene pooljuhtraadioseadis valmistati 1900. aastal. Näete, kui soliidses eas ta on! Selle leiutas raadio looja — Aleksandr Stepanovitš Popov.

See oli detektor — seadis, mis alaldab vahelduvvoolu ja samaaegselt — too ongi peamine! — eraldab kasuliku madalsagedusliku signaali teda kandvast kõrgsagedusest.

Me ei peatu siinkohal sellel, kuidas toimub raadiosaade. Meenutame vaid, et helisagedusvõnkeid, mis tekivad mikrofonis inimese hääle mõjul, ei saa edasi anda raadio teel, seepärast tuleb neid «liita» kõrgsagedusvõngetega, mida saadakse erilises lampgeneraatoris, ja juba pärast seda raadiolainete kujul ruumi kiirata. Vastuvõtja peab aga laine kinni püüdma, nõrku, kaugelt saadud kõrgsagedusvõnkeid võimendama ja nende kuju järgi madalsagedusvõnkeid — helisagedust tekitama. Just seda teebki detektor.

On asju, mis hämmastavad kujutlusvõimet isegi siis, kui nad tungivad igapäevasesse ellu, muutuvad tavalisteks. Kes poleks veel meie päevilgi vaimustust tundnud raadiovastuvõtja üle! Te pöörate täielikus vaikuses nuppu, ja väikesest puitkastist voogab muusika, kostab kõne... Helid jõuavad teieni maakera kõikidest nurkadest. Neid ei püüa kinni mitte mingisugune muinasjutuliselt tundlik kõrv, vaid too puukast, mis on täis traate, igasuguseid torusid ja plaate, tabab need arusaamatul kombel endist viisi vaiksest ruumist. Raadio töötamispõhimõtet tunnevad nüüd isegi kooliõpilased, kuid igal sugupõlvil tuleb ikka ja jälle vaimustuda sellest «nõidusest».

Milline võis siis olla mulje raadiosaadetest meie sajandi koidikul! Veel kahekümnendatel aastatel ja isegi kolmekümnendate algul näis raadiovastuvõtja peaaegu imena. Selle põhiliseks osaks jäi endiselt pooljuhtdetektor (mille järgi ka vastuvõtjat ennast nimetati detektorvastuvõtjaks) — püriidi-, galeniidi- või karborundikristallid koos väikese, nupu külge kinnitatud metalltraadiga. Traadiga torgiti kristalli — otsiti «tundlikku» punkti, millal kõrvaklappides oli kuulda helisid. Kuid nende helidega kaasnesid tavaliselt müra, ragin, kahin. «Tundlikke» punkte ei olnud kerge leida ja pealegi polnud need millegipärast kuigi tundlikud. Ja see jäi kauaks ajaks teadlastele mõistatuks.

Siinkohal tuleb teemast kõrvale kalduda, et jutustada ühest episoodist pooljuhtide füüsika ajaloos. See ei ole, tõsi küll, seotud detektoriga, kuid on viimasega vahetus ühenduses.

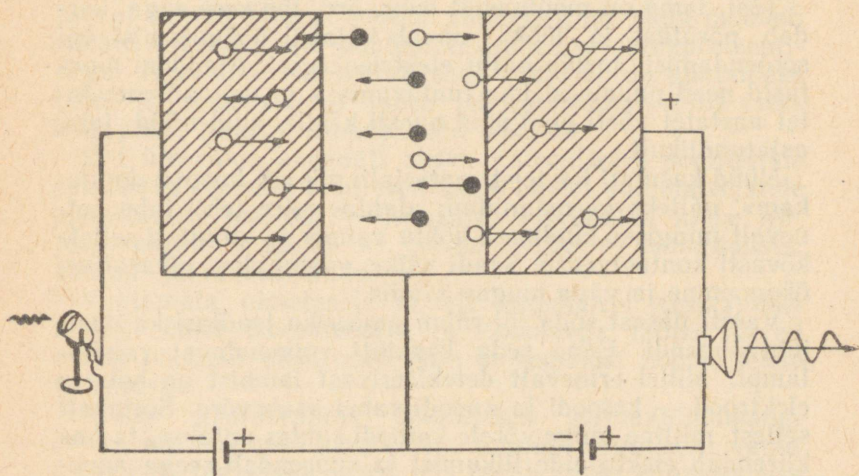
Aastat kolmkümmend tagasi loodi esimesed pooljuht-

alaldid. Need valmistati vasest. Vaskplaati kuumutati ahjus ja metalli pind oksüdeerus: sellele ilmus pooljuhi — vaskalahapendi kiht. Niisugust alaldit nimetati kuproksalaldiks (ladinakeelsete sõnade *cuprum* — vask ja *oxygenium* — hapnik järgi).

Siis arvati, et alaldav siire tekib metalli ja pooljuhi vahel — vase ja vaskalahapendi vahel. Eelmisest peatükist on lugejale juba selge, et niisugune siire võib moodustuda ainult pooljuhtides kihtide vahel, millel on erinevat liiki juhtivus — elektron- ja urvejuhtivus, mistõttu seda siiret nimetataksegi elektron-urvesiirdeks. Metalliga pooljuhi vahel on kontaktpinge tavaliselt väike ega suuda anda märgatavat alaldamise efekti. Tollal seda veel ei teatud.

Vaskalahapendi peale kanti metallikiht, et luua teist kontakti. Seejuures arutati nii: mitte igasugune metall ei moodusta pooljuhiga alaldavat siiret, seepärast täidab teine kontakt siin vaid kõrvalist osa. Prooviti aga seda kontakti samuti vasest valmistada — märgati, et alaldi töötab endist viisi suurepäraselt.

See oli juba täiesti arusaamatu. Pooljuhti piiras kahest küljest vask. Näis, et ka alaldavaid siirdeid pidanuks olema kaks: üks laseb voolu läbi ainult ühes suunas, teine



Nõnda lülitatakse ahelasse transistor.

— üksnes vastassuunas. Seega ei oleks aparaat üldse võinud elektrit juhtida. Tegelikult oli lugu hoopis teisiti.

Mõistatuse lahendamisel avastasidki nõukogude teadlased alaldis needsamad kaks liiki pooljuhti. Üks neist oli vaskalahapendi põhikiht, mis oli ahjus küllastunud hapnikust ja omas urvejuhtivust. Selle kihi all, vahetult alusplaadil, asus väga õhuke elektronpooljuhi kiht — vaskalahapend, mis oli rikastunud vaseosakestega.

Kui nüüd detektori juurde tagasi pöörduda, siis saab otsekohe selgeks, et selle konstruktsioon vastas vanale ettekujutusele alaldist — metall ja pooljuht. «Tundlikeks» punktideks aga osutusid kohad, kus kristalli pinnal moodustusid juhuslikult teist liiki pooljuhi täpikesed. Kui aga juhuslikult, siis võis neid järelikult olla nii vähem kui ka rohkem, täpid ise võisid olla suuremad ja väiksemad jne.

Detektori ebakindlus ja selle kasutamisega seotud raskused sundisid talle asendajat otsima. Niisuguseks asendajaks sai vaakuumraadiolamp. Vedruga kristalli asemele ilmus klaasballoon, milles on kaks metallelektroodi — katood ja anood. Katoodi kuumendab patareist saadav vool ning ta emiteerib elektrone. Anood, kui ta on laetud positiivselt, tõmbab neid elektrone enda poole, kui aga negatiivselt, siis tõukab eemale. Seega juhib lamp voolu ainult ühes suunas.

Tõsi, lamp on mõõtmetelt suur, õrn, lühikese eaga, kardab põrutust ja lööke, nõuab katoodi hõõgutamist või soojendamist, tarbib palju elektrienergiat. Ajapikku muutusid need puudused üha tuntavamaks ja neljakümnendatel aastatel võeti pooljuhid uuesti käsile, kuid nüüd juba asjatundlikult.

Nüüd kasutati ka teist materjali, mis oli hoopis «kuulekam», näiteks germaaniumi; alaldav siire tehti juba eelnevalt mingisse kindlasse kohta valmis ja kinnitati sellele kõvasti kontaktvedru. Saadi väike, vastupidav, pikaealine, ökonoomne ja väga mugav seadis.

Varsti pärast sõda lõi rühm ameerika teadlasi ka pooljuhtvõimendi. Enne seda kasutati võimendavat raadiolampi, millel erinevalt detekteerivast lambist on kolmas elektrood — katoodi ja anoodi vahel asub võre. Sõltuvalt sellest, milline pinge võrele katoodi suhtes antakse, ta kas kiirendab elektronide liikumist ja suurendab seega anoodile sattuvate elektronide hulka või tõukab neid katoodi poole tagasi, praktiliselt «sulgedes» lambi.

On ka nelja ja viie elektroodiga lampe. Elektroodide arvust sõltub lambi nimetus — diood, triood jne. Mida keerukam on lambi ehitus, seda kapriissem ja ebakindlam ta on. Pooljuhtvõimendi on aga niisama lihtne ja vähenõudlik nagu detektorgi. Teda nimetatakse pooljuhttrioodiks või sagedamini — transistoriks.

Transistori ilmumisega avanes raadiotehnika ees võimalus täielikult vabaneda raadiolampidest. Täidavad ju trioodid raadiotehnikas peamist osa: nad on võimenditeks, võnkumiste generaatoriteks jne. Seepärast peetakse just transistori leiutamist sageli pooljuhtide ajastu alguseks. Kuid juba esimestest sammudest peale kerkis nende ette niivõrd tõsine takistus, et alguses näis see üldse ületamatu.

Te mäletate, et germaanium on väga tundlik lisandite suhtes: tema elektrilised omadused võivad järsult muududa üheainsa võõra aatomi sattumisel pooljuhi enda miljardi aatomi hulka. 0,000 000 1 — üks kümnemiljondik osa protsendist — selline on lubatav lisanditesisaldus germaaniumis! Muidugi ei käi see kõigi lisandite kohta. Mõned, mitte niivõrd «mõjukad» ained, näiteks süsinik või tina, on talutavad suuremas koguses. Vask aga on lubatav vaid eespool mainitud annusena. Ja mitte rohkem.

Kuidas aga saavutada säärasest puhtuse astet? Veel hiljuti ei tulnud midagi taolist pähegi. Enne sõda mõõdeti metalli laboratoorset puhtust lisandite sajandikprotsentidega. Aga siin tuli metall sada tuhat korda puhtamaks teha, ja seda sugugi mitte laboratooriumis (siis oleks kõik poole lihtsam olnud), vaid tehases!

Ent ülesanne lahendati siiski. «Steriilsete» pooljuhtide saamiseks töötasid teadlased välja täiesti uue materjalide puhastamise meetodi — tsonaalse sulatamise, mida hiljem rakendati muide ka teistel aladel — lennunduses, aatomi- ja raketitehnikas...

Vaatamata nimetusele ei ole tsonaalsel sulatamisel midagi ühist tsooniteooria ja tsoonidega, milles võivad asuda pooljuhi elektronid. Siin on tegemist hoopis teiste tsoonidega.

Kitsas grafiitvannis sulatatakse germaaniumikangi osade, nn. tsoonide kaupa. See toimub järgmiselt: vanni ümbritseb induktsioonpool, mis tagab kangi kuumutamise kõrgsagedusvooluga väga kitsas piirkonnas. See elektriahi liigub aeglaselt piki kangi edasi ja koos ahjuga liigub ka

sulagermaaniumi tsoon. Taolist protseduuri korratakse kaks-kolm korda ning iga kord eemaldub germaaniumist üha rohkem lisandeid. Küsite — mis pärast? Sellepärast, et kui kristallvõre tekib järk-järgult vedelikust, lülituvad võre koosseisu esmajärjekorras germaaniumi enda aatomid, lisanditel aga, eriti nendel, millel on teine valents, ei ole nii kerge endale kohta leida. Teiste sõnadega, lisand lahustub erinevalt nii aine vedelas kui ka tahkes faasis.

Järk-järgult riisuvad «soojusrehad» suurema osa lisandest kangi otsa, mis pärast ära lõigatakse ja uuesti töödeldakse.

Ülejäänud osa kangist ei ole aga veel valmis. Ta sulatakse uuesti üles, seekord ümmarguses tiiglis, ja pärast seda kasvatatakse kristalli rippuvus asendis, aeglaselt kerikival varval. Pärast niisugust «vedelikust väljatõmbamist» muutub kristall korrapärasemaks ja vabaneb ühtlasi täiendavalt lisandest.

Muidugi mõista ei toimu tsonaalne sulatamine ning «väljatõmbamine» mitte õhus, vaid vaakuumis või inertsete gaaside atmosfääris. Ja sellele vaatamata tuleb õhku ruumis, kus niisugust tööd tehakse, eriliselt puhastada, ruum ise aga peab olema ilma igasuguste karniiside ja kaunistusteta, siledate, õlivärviga kaetud seintega, millele ei kogune tolmu. Kogu aparatuuri ja gaase, mis ümbritsevad sulagermaaniumi, puhastatakse samuti hoolikalt ja mitu korda vähimatestki kõrvaliste ainete jälgedest. Ja ainult seda lisandit, mis on vajalik germaaniumile teatud omaduste andmiseks, viiakse spetsiaalselt sulatisse täpselt mõõdetud hulgal.

Seejärel, kui valmiskangi metallurgiatehasest raadiotehasesse viiakse, algab uus seeria toiminguid, mille eesmärgiks on germaanium puhas hoida, mitte tema juhtivust rikkuda.

Transistori valmistamise protsess on lühidalt järgmine. Kang saetakse tillukesteks plaatideks — lehekesteks, iga lehekese kummalegi poolele kinnitatakse vaevumärgatav terake indiumi (indiumi lisamine muudab juhtivuse tüüpi äärmises osas ning loob vajaliku kolmekihilise pooljuhi) ja juuksekarvast mitu korda peenemad kuld- või nikkeltraadid. Kõik see asetatakse spetsiaalses vormis — mitte mänguvormis, vaid juveliirseltsi miniatuurses vormis — ahju, sulatatakse ühte, võetakse seejärel vormist välja ja suletakse kapslisse.

Näib, nagu operatsioone ei olekski nii palju. Kuid tegelikult on neid kümme-kakskümmend korda rohkem. Siia kuulub nii lehekeste lihvimine kui ka nende söövita- mine hapetes, nii lehekeste ja valmissiirete mitmekordne keetmine vesinikülihapendi ning sööbenaatriumi lahustes kui ka mitmekordne uhtmine destilleeritud veega, ja isegi mitte lihtsalt destilleeritud, vaid ka deioniseeritud veega, mis on niinimetatud ioonide (ioonvahetusvaikude) abil puhastatud ioonidest, mis võisid jääda vette pärast destilleerimist.

Ent kõigile neile keerukaile operatsioonidele vaatamata on germaaniumiga ikkagi võrratult kergem toime tulla kui tema «venna» räniga. Ráni on osutunud samuti suurepäraseks, mõnes suhtes isegi paremaks pooljuhiks kui germaanium. Ent ta on veelgi tundlikum lisandite suhtes ja sulab kõrgemal temperatuuril (peaaegu poolteist tuhat kraadi), kus on veelgi raskem kaitsta sulatist saastumise eest. Ei leidu sellist ainet, millest võiks valmistada ränile täiesti ohutut tiiglit. Ja siis leiutati hoopis imepärane meetod — tiiglit tsonaalne sulatamine.

Ränikang on vertikaalses asendis ning mööda seda liigub rõngasahi aeglaselt üles-alla. Vedelik ei valgu sulatatud tsoonist ära pindpinevuse tõttu. Ümberringi on muidugi kaitseatmosfäär, vajaduse korral ka lisandite aurud, mis peavad tungima pooljuhi koostisse ning andma sellele teatud omadusi.

Nii germaaniumi kui ka ráni jaoks on välja mõeldud igasuguseid täiustusi, mis võimaldavad reguleerida ja muuta kristalli koostist selle kasvamise ajal, et saada juba siis valmis elektron-urvesiirdeid — jääb üle ainult kang lehekesteks saagida ja kontaktid külge joota. Lühikese aja jooksul on tekkinud täiesti uus, omapärane tehnikaala — pooljuhtide metallurgia, mis on teinud võimalikuks kristalldetektorite ja transistoride hulgitoot- mise.

Neid seadiseid on hakatud kasutama näiteks portatiiv- setes raadiovastuvõtjates ja üldse patareivastuvõtjates. Just siin on eriti kasulikud nende väikesed mõõtmed, pikk iga ja ökonoomsus — transistorvastuvõtja tarbib mitu korda vähem energiat kui lampvastuvõtja.

Nõukogude raadiotehastes lastakse juba välja tasku- vastuvõtjaid «Gauja» (kaaluga 500 g) ja «Neva» (300 g), portatiivseid vastuvõtjaid «Atmosfera» ja «Spidola», vas-

tuvõtjaid «Minsk», «Minsk-1», «Ausma», taskuvastuvõtjat «Lastotška» ja portatiivset radioolat «Kristall».

Ka teistes maades toodetakse arvukalt portatiivseid vastuvõtjaid.

Tavalisteks on muutunud ultralühilaine-raadiotelefonid kiirabiautodes ja taksodes, kompaktsed raadiojaamad geoloogidel — nii saatja kui ka vastuvõtja on monteeritud telefonitorusse jne. Isegi raadiovastuvõtja käekella kapslis üllatab tänapäeval vaid väheseid.

Mõned aastad tagasi tekitas sensatsiooni üliväike raadiosaatja ravimkuulikeses. Saatja oli konstrueerinud tuntud saksa teadlane Manfred Ardenne (SDV). «Reportaaž maost», mida annab ravimkuulike, rõõmustas arste väga.

Nüüd on niisuguseid ravimkuulikesi paljudes maades, sealhulgas ka meil. Nõukogude «rändlaboratoorium» on isegi väiksem kui saksa oma: tema pikkus on 20 mm, diameeter 8 mm. Raadiolaineid ravimkuulikeselt võtab vastu antenn, mis on haigele vööna ümber seotud, edasi aga läheb signaal mööda juhet arsti laual asuvasse vastuvõtuaparaati. Ravimkuulikesse paigutatud saatja — happesuse, temperatuuri või rõhu mõõtja — muudab generaatori võngete sagedust ja arst saab otsekohe teada analüüsi tulemused. Kas on vajagi mainida, kui võrd meeldivam on haigele näiteks maomahla selline uurimisviis sondi neelamise asemel?

Kirjeldatud ravimkuulikesese taolisi seadmeid võib kasutada mitte ainult arstliku kontrolli ajal. Meedikutel tuleb sageli pidevalt jälgida haige olukorda, kui ta lamab voodis või kui ta kõnnib. Kuidas sellega toime tulla, kuidas õigeaegselt ära hoida rasket atakki, mis niisugustel haigetel tihti ähvardab tervist, sageli isegi elu? Ka siin tulevad appi pooljuhid.

Kogu seadis on väikese mündi suurune. Pannakse see samuti nagu kõrvarõngas kõrva. Ühele poole kõrvanibu jääb tilluke lambike, teisele — fototakisti. Viimane reageerib veretuksetele ja isegi vere koostise muutumisele. Meditsiiniline «kõrvarõngas» annab teateid pulsi sagedusest, hemoglobiini sisaldusest veres, kehatemperatuurist. Niipea kui ilmnevad rahutuks tegevad tundemärgid, saadab automaat raadio teel signaali valvearsti kabinetti.

Esialgul kasutatakse niisuguseid seadiseid üksnes stationaarides, kuid aja jooksul hakkab automaatpõetaja saatma haiget ka pärast kliinikust väljakirjutamist. Sel-

leks tuleb vaid suurendada miniatuurse raadiojaama võimsust, mis saadab arstidele signaale haige enesetunde kohta.

Elektroonika avas võimalused uurida mitte ainult haiget, vaid — mis on võib-olla veelgi tähtsam — ka tervet organismi loomulikes tingimustes. Teadus sai esmakordselt usaldusväärseid andmeid selle kohta, kuidas kulgevad kõikvõimalikud eluprotsessid tootmistöölisel, sportlasel võistluste ajal, üldse liikuval inimesel. Uus raadiotehnika haru — biotelemeetria (füsioloogiliste suuruste mõõtmine raadio teel) tegi läbi kõige tõsisema kontrolli kosmonautide lennu ajal. Kuid sellest edaspidi.

Nii muutuvad tavalisteks asjad, mis alles üsna hiljuti olid täiesti mõeldamatud. Veel üks taoline näide. Kui südamekoonete rütm on häiritud, tuleb appi elektrostimulaator — seadis, mis saadab südamesse vajaliku sagedusega elektriimpulssi. Veel hiljuti kujutas elektrostimulaator endast kogukat seadeldist, mis kaalus ligi 30 kg, ja haige oli juhtmetega selle külge «aheldatud». Nüüd on see karbikene, mis ei ole suurem taskukellast, kaalub mõnikümmend grammi ja õmmeldakse haigele otse kehasse. Ei mingeid juhtmeid — ela ja tegutse kui täiesti terve inimene, ainult ära unusta viie aasta (5 aasta!) pärast kliinikusse astumast, et aparati laadida. On loodud samasugune aparaat, mis võimaldab südant stimuleerida raadio teel — siis, kui arst seda vajalikuks peab. Ja need on jällegi pooljuhid.

Nüüd on isegi juba niisuguseid konstruktsioone, millega võrreldes raadiosaatja ravimkuulikeses näib hiiglasena. Näiteks võib näha raadiojaama ... hambas. Jaa, jaa, raadiosaatja paigutatakse hamba sisemusse, et detailselt uurida hamba tööd. Aga osa kuulmisaparaadist — kõige tähtsam osa, vähendatuna hernetera suuruseni — õmmeldakse haigele naha alla, keskkõrva lähedusse.

Ja igal niisugusel elektronseadisel on toiteallikas — pisitilluke patarei, mis on monteeritud niihästi ravimkuulikesse, elektrostimulaatorisse kui ka «hamba»-raadiojaama. Need näited tõendavad ilmekalt, kui vähe energiat vajavad pooljuhttraadioseadised, kuivõrd nad on ökonoomsemad vaakuumraadiolampidest.

Nõukogude inseneride konstrueeritud pooljuhtteleviisor tarbib võrreldamatult vähem energiat kui lamptelevisior — 6—7 kopika eest kuus. Jaapanis aga on valmista-

tud portatiivne pooljuhtteleviisor mõõtmetega 11×15×16,5 sm, mis kaalub 2,8 kg. Varsti muutub taskuteleviisor niisama tavaliseks asjaks, nagu praegu on taskuraadiovastuvõtja.

Lõpuks veel üks väga suur pooljuhtseadiste eelis — nende töökindlus. Meie ajastul on töökindluse probleem muutunud üheks kõige tähtsamaks probleemiks tehnikas. Töökindlus on peamine kvaliteedinäitaja, mis määrab iga tehnikatoote üldised omadused.

Huvitav on radioelektroonilise aparatuuri töökindluse statistika. Selle kõige ebakindlamad elemendid on vaakuumlampid. Need moodustavad keskmiselt mitte üle 10% kõikidest aparatuuri elementidest, kuid häirete hulk nende töös, või teisiti öeldes, tõrgete arv nende süü tõttu ületab sageli 50%.

Pooljuhid on oma ehituse poolest võrreldamatult kindlamad vaakuumlampidest: neil ei ole õrna klaaskesta, nad ei vaja vaakuumi, mida on nii raske säilitada, jne.

Eriti torkab see pooljuhtide eelis silma siis, kui nad asendavad raadiolampe keerukates seadmetes, kus kasutatakse paljusid lampe või transistore. Kuni jutt on vastuvõtjaist ja televiisoreist, on tähtsamad uute seadmete muud omadused. Kui aga jõuame raadiolokaatoriteni, televisiooni- ja raadiosaatjateni, eriti aga elektronarvutiteni, siis kerkib kõikjal esiplaanile just töökindlus.

Elektronarvuti on üks XX sajandi teaduse kõige tähelepanuväärsemaid saavutusi. Ülemaailmselt tuntud inglise teadlase professor J. Bernali arvamus järgi on niisuguste masinate loomine meie aja kõige revolutsioonilisem avastus. Elektronmasinat kasutatakse üha laialdasemalt inimese praktilises tegevuses — niihästi suurepärase arvutina, tootmise juhtimise organina, automaatsüsteemide südadena, ületamatu planeerijana kui ka diagnoosiarsti abilisena. Samaaegselt muutub elektronarvuti üha võimsamaks uurimisvahendiks: ta säilitab ja töötab ümber tohutul hulgal informatsiooni, aitab teadlastel üldistada ja kõrvutada fakte, välja selgitada loodusseadusi ja teha avastusi. Teaduse ja tootmise arenemine kaasaegsel epohhil muutub ilma elektronarvutiteta võimatuks. Seda tähtsam on tagada nende häireteta töö.

Elektronarvutis on kümneid ja isegi sadu tuhandeid lampe. Niisuguse hulga puhul muutub nende vähene töökindlus lausa nuhtluseks — iga minut läheb rivist välja

kord üks lamp, kord teine. Transistorid on aga võimelised tõrkumatult täitma oma osa ettenähtud teenistusaja jooksul, kusjuures see aeg on neil palju pikem kui lampidel.

Seega on pooljuhid niihästi kompaktsed kui ka lihtsad, niihästi vastupidavad kui ka pikaajalised, niihästi ökonoomsed kui ka töökindlad... Kõiki nende väärtusi ei jõua üles lugedagi. On nad siiski juba igas tükis head? Ei, ka detektoritel, eriti aga transistoridel, on puudusi, pealegi veel üsna tõsiseid.

Mõlemad seadised kardavad näiteks kõrget temperatuuri. Germaaniumil on lubatavaks piiriks 70° , ränil — 150° . See põhjustab sageli häireid, kuna töötav aparaat võib läheduses asetsevate mootorite või muude soojusallikate mõjul ka tugevamini kuumeneda. Tõsi küll, see puudus on kõrvaldatav (edaspidi näeme, millisel teel).

Transistoridele on samuti omane «parameetrite hajuvus». Pooljuhtide ääretu tundlikkus kõrvaliste lisandite suhtes ei luba toota täpselt ühesuguseid transistore. Lõpuks on transistoride puuduseks ka suured omamürad. Kerge, näiliselt põhjusetu kahin, mis on kuulda lampvastuvõtjas, tekib voolu kõikumisest lampides. Kristallseadistes on niisugused võnkumised hoopis märgatavamad.

Kõik loetletud puudused tulid ilmsiks kohe pärast seda, kui pooljuhid alustasid oma võidukäiku raadiotehnikas. Ja juba siis suunasid teadlased oma pingutused sellele, et kõrvaldada või vähemalt nõrgendada neid puudusi. Viimaste aastate sündmused on kujukalt tõendanud, et need pingutused ei ole asjatud olnud. Eelkõige tuleb muidugi kõnelda nõukogude teaduse ja tehnika silmapaistvatest võitudest kosmose alistamisel.

JA TÄHED JUTTU PUHUVAD

Missugune rahvahulk tungles ühe stendi juures elektroonika paviljonis rahvamajanduse saavutuste näitusel, kui seal pandi esmakordselt välja raadiosaatja «Majak»! Just nimelt niisugused saatjad paigaldati meil Maa tehiskaaslastele, mis olid siis inimgeeniuse kõige suuremaks saavutuseks.

Tavalisest telefoniaparaadist pisut suurem raadiosaatejaam ise näis tollal imeväärseks. Ent kui lisada, et niisu-

gune mudilane lendab mõeldamatu kiirusega pilvetagustes kõrgustes, mida isegi ette kujutada on raske, ja kogu maailma radistid võtavad vastu tema signaale, siis oli see tõepoolest rabav. Igaüks võis paluda valvurit, et see saatja sisse lülitaks, ja siis kostis valjuhääldajatest lae all üle kogu paviljoni tuttav «piip-piip-piip», mis nüüd on muutunud meie saavutuste sümboliks ning saanud raadios päevauudiste eelsignaaliks.

Igast uuest teatest järjekordse nõukogude sputniku väljalaskmise kohta otsisid silmad iseenesest: kas on sellel pooljuhtsaatja? Niisuguses tähtsas asjas ilma nendeta toime ei tule — selle mõttega olid kõik harjunud.

Ja kui 4. oktoobril 1959 saadeti nõukogude planeetidevaheline automaatjaam lennule ümber Kuu, näis iseenesest mõistetavana, et selle raadiojaam ja televisioonsaatja on ehitatud põhiliselt pooljuhtseadiste baasil. See oli esimene kunstlik taevakeha, mida juhiti Maa pealt. Ta lendas mööda keerukat trajektoori, tegi ringi ümber Kuu ja lähenes uuesti Maale. Lendav automaat fotografeeris Kuu tagakülge, mida keegi siinemaani ei olnud näinud, ilmutas filmi kaalutuse tingimustes ja andis seejärel kujutise televisiooni teel edasi maapealsele vastuvõtjale.

See oli hulljulge eksperiment. Maa peal oli televisioonisaadete kaugvastuvõtt mitme tuhande kilomeetri taha ilma retranslatsioonita äärmiselt haruldane sündmus. Telesaatja tavaline saateraadius on ju kuni sada kilomeetrit. Siin aga toimus saade sadade tuhandete kilomeetrite taha.

Vastuvõtuseadmesse Maal jõudis sada miljonit korda väiksem võimsus, kui tavaliselt võtab vastu televiisor. See katse hämmastas kogu maailma. «Isegi nõukogude teaduse kõrge taseme juures on see tõepoolest märkimisväärne saavutus», kirjutas inglise professor Lowell, ühe maailma suurima raadioobservatooriumi, Jodrell Banki direktor.

Kuu «teise palge» fotod, mis anti välja eri atlasena ja mida palju kordi on avaldatud ajalehtedes, ajakirjades, raamatutes, läksid hinnalise panusena maailma teaduse varasalve.

Viis aastat on möödunud planeetidevahelise automaatjaama lennust Kuu juurde. Kõigest viis aastat, aga kui palju sündmusi on need kaasa toonud, kui palju uusi imetlusväärseid saavutusi kosmoses! Ja nüüd juba annavad alatiselt igaühte neist oma panuse pooljuhid.

«Las käia!» — need reipad, uljad sõnad, mis Juri Gagarin stardihetkel lausus, kandusid mööda maailma laiali raadiolainete abil.

Uued võidud oleksid nagu tumestanud Gagarini kangelastegu, kuid ka täna loeme erutusega tema raadiovestlusi Maaga.

«Kuulen teid väga hästi. Enesetunne on väga hea. Lend jätkub edukalt.»

Igaveseks säilitab ajalugu üleskirjutuse kosmose Kolumbuse teadetest.

Gagarini järel siirdus taevaalotusse tema sõber German Titov, kes viibis kosmoses juba üle ööpäeva ja alati, kui vaja, kõneles Maaga. Hiljem, Punasel väljakul, lausus ta: «Raadioside töötas nii hästi, et kogu lennu kestel võisin igas orbiidi punktis pidada sidet oma armsa Kodumaaga.»

Ja lõpuks, 1962. aasta augustis, läksid kosmosesse ühekorraga kaks vägilast — tähevennad Andrian Nikolajev ja Pavel Popovitš. 24 tundi oli A. Nikolajev orbiidil üksinda, seejärel aga lendasid nad kolm ööpäeva koos, peaaegu kõrvuti — isegi nägid teineteist. Esimene tegi ümber Maa üle 64, teine üle 48 tiiru. Täitnud mahuka tööprogrammi, rikastanud teadust märkimisväärsete vaatluste ja avastustega, maandusid nad praktiliselt samal ajal kindlaksmääratud rajoonides.

1963. aasta suvel käis koos V. Bõkovskiga kosmoses ka esimene naine — Nõukogude Liidu kodanik Valentina Nikolajeva-Tereškova. Tema lend oli uueks suureks sammuks kosmose alistamises.

Kosmoselaevadele «Vostok-3» ja «Vostok-4» oli paigaldatud täiustatud (võrreldes kosmoselaevadega «Vostok-1» ja «Vostok-2») raadioelektroniline pooljuhtaparatuur. See töötas häireteta. Kogu lennu kestel säilis pidev side Nõukogude Liidu raadiojaamadega. Esmakordselt rääkisid kosmonaudid Maaga raadiotelefoni kaudu. Kasutades tavalist telefoni, vestles nendega Nikita Sergejevitš Hruštšov.

Sellest, kuivõrd hästi töötasid pardavastuvõtjad, annab tunnistust huvitav fakt. Asudes Maa atmosfääri ülakihtides, kust Kuu oli äärmiselt hästi näha, kuulas Pavel Popovitš samaaegselt loengut meie looduslikust kaaslastest. Seda loengut anti edasi ühe maapealse raadiojaama kaudu.

Esmakordselt seati sisse ka raadioside kosmos—kosmos.

Kaks üheaegselt orbiidil asuvad kosmoselaeva pidasid kogu grupilennu jooksul omavahel kahepoolset sidet. Sõbrad kuulsid teineteist nii, nagu oleksid nad kõrvuti olnud ja lihtsalt vestelnud. Nad jagasid pidevalt muljeid, soovisid teineteisele head ööd ja isu, heitsid nalja ning laulsid isegi duetti.

«Mis sa õhtuks sõid?» küsis üks.

«Sedasama mis sinagi,» vastas teine, «desserdiks aga närisin voblat...»

«Voblat? Anna õige mulle ka...»

«Minugipärast, lenda lähemale, annan muist sinule...»

Toimusid ka tähevendade — Andrian Nikolajevi, Pavel Popovitši ja komandopunktis asuva Juri Gagarini kolme-poolsed läbirääkimised.

Maa kuulis kosmonaute raadio kaudu ja nägi neid ka televisiooni teel. Televisioonivaatlusi teostati varemgi — jälgiti neljajalgsete kosmonautide, samuti Juri Gagarini ja German Titovi lendu, kuid seekord transleeriti tähepilootide kujutus esmakordselt otse kosmosest televaatajateni, kes just kui ise kandusid kosmoselaeva kabiini, nägid oma silmadega kosmonaute just praegu, selsamal hetkel, taeva laotuses lendamas.

Viisteistkümme korda kolme päeva jooksul andis Nõukogude Liidu Kesktelevisioon otsesülekandeid kosmosest. Neid jälgisid miljonid televaatajad niihästi meie maal kui ka Euroopas. Ja neil päevil sündis uus sõna — kosmovisioon. Nõukogude kosmovisioon on veel üks teaduse ja tehnika väljapaistev võit, mis saavutati pooljuhtide abil.

Televisioon aitas arstidel jälgida kosmonautide seisukorda. Peale selle saabusid Maale objektiivsed andmed. Sooritades määratus kõrguses oma võrratuid, tohtu kiireid lende, allusid kosmoselaevade piloodid iga minut, stardist kuni maandumiseni, kõige rangemale, kõige üksikasjalisemale meditsiinilisele kontrollile. Raske on seda ette kujutada, ent arstid, kes asusid Maal, teadsid paremini, kuidas tunnevad ennast Gagarin, Titov ning eriti Nikolajev ja Popovitš, kui seda teadsid kosmonaudid ise. Vähingi normist kõrvalekaldumine, mis jäi kosmonautidele märkamatuks, registreeriti otsekohe maapinnal. Ja kui miski oleks arstid ärevusse viinud, oleks lend otsekohe katkestatud, vaatamata kosmonautide enesetundele.

«Vostok-3» ja «Vostok-4» komandöridel registreeriti

südamelihaste tööd (elektrokardiogramm), hingamisliigutusi (pneumogramm), aju biovoolusid (elektroentsefalogramm), silmade liikumist (elektrookulogramm), naha galvaanilisi reaktsioone ja eraldi pulsi ning hingamise sagedust.

Teha elektrokardiogrammi või elektroentsefalogrammi kliinikus tähendab raisata vähemalt pool tundi, kusjuures juhtmete rägastikku mässitud patsient ei tohi teha ühtki liigutust. Aga siin tuli kõik teha kiiresti, märkamatu, häirimata kosmonauti tema pingelises töös, ja mis peamine, ülekoormuse, vibratsiooni, järskude temperatuuri-kõikumiste tingimustes, kusjuures kõigele lisaks elektriliste häirete tase oli kõrge. Kuidas näiteks registreeriti aju biovoolusid? Kosmonaudi peas oli kiiver väikeste hõbeelektroodidega lauba ja kukla piirkonnas. Elektroodidele kantud eriline pasta tagas nende tiheda kontakti nahaga. Elektroodide juurest läksid juhtmed pooljuhtvõimendusploki. Mõõtmelt — koos toiteallikaga — oli see veidi suurem tikutoosist ja mahtus vabalt taskusse. Siit aga anti võimendatud biovoolud edasi juba pardaaparatuurile.

Tähepilotide meditsiiniliste vaatluste kõik üleskirjutused on teaduse hindamatu vara. Neid uuritakse kaua ning hoolikalt ja nad on aluseks järgmiste kosmoselendude teadusliku programmi väljatöötamisel. Ent juba praegu on selge: küigivõrd tõsisid häireid kosmonautide seisukorras ei olnud. Ja sellest jutustasid märkamatud abilised — biotelemeetria vahendid.

Sidesüsteem teatas Maale ka kosmoselaeva kõikide osade tööst ja Maalt läksid tagasi signaalid lennu juhtimiseks. Seal, Maa peal, võrdlesid arvutid (jälle pooljuhid) lennuandmeid varem koostatud programmiga, mis saadi keerukate arvutuste tulemusena, ja andsid vastavaid käsklusi.

Kuivõrd vastutusrikas üritus too oli, sellest räägib niisugune näide. 1962. aasta juulis saatsid ameeriklased välja kosmoselaeva Veenuse suunas. Ent stardist ei olnud möödunud viit minutitki, kui laev lõhkes. Mispärast? Ta kaldus kursist kõrvale, nagu hiljem selgus, «väikese» vea tagajärjel: liikumise arvutamisel unustati ära üks märk. Ebaõnnestumine läks maksma peaaegu kakskümmend miljonit dollarit.

Kogu side- ja juhtimisaparatuur peab olema erakordselt töökindel. Seda saavutada on muidugi äärmiselt raske.

Piisab, kui öelda, et töötingimused kosmoselaeval erinevad järsult mitmesugustel lennu etappidel — orbiidile viimisel, orbiidil endal ja maandumisel. Raske on see isearanis sellepärast, et kogu side- ja juhtimissüsteem koosneb tohutust hulgast elementidest. Kuid just nendes tingimustes, nagu me juba teame, on töökindlus eriti oluline.

Ei ole juhuslik ka see, et A. Nikolajevit ja P. Popovitšit eraldas kosmoses kõigest 6,5 kilomeetrit — vähem kui sekund mõlema laeva liikumises. See jättis spetsialistidele terves maailmas eriti tugeva mulje ja andis tunnistust raketi kogu stardi- ja juhtimissüsteemi erakordsest täpsusest ning töökindlusest. Niihästi see fakt kui ka «Vostok-3» ja «Vostok-4» täpne maandamine kõigest seitsmeminutilise vaheajaga (tarvitseb vaid meenutada raskusi, mis kaasnesid ameerika kosmonaudi Glenni stardiga ja tema kaasmaalase Carpenteri maandamisega), temperatuuri ja teiste tingimuste stabiilsus kosmoselaevade kabiinides, mis on ameeriklastele seni saavutamatu, kui ka, lõpuks, kaugnägemine kosmoses, mis on meil juba viiendat aastat ja mis Ameerika Ühendriikides veel puudub, — kõik see kinnitab vaieldamatult Nõukogude Liidu tohutut üleolekut kõigi kosmose vallutamisele kaasa aitavate teadus- ja tehnikaharude arendamisel.

Aeg, mis on möödunud 12. aprillist 1961 — pärast inimese esimest lendu kosmosesse —, muutis paljutki inimeste psühholoogias. Ta on sundinud mitmeidki uut moodi vaatama Nõukogude Liidule — eesrindliku teaduse ja võimsa tehnika maale. Samaaegselt toimus teinegi pööre. Eranditult kõik tajusid, et sajanditepikkune, varem absoluutselt teostamatu unistus sai tegelikkuseks. Reaalse mõtte omandasid suure K. E. Tsiolkovski, kosmoseajastu ettekuulutaja sõnad, et «Maa on inimkonna häll, kuid ei saa ju igavesti hällis elada». Kosmos on muutunud meie sajandi romantikaks.

Ja seepärast ahvatlevad tulevased ajad veel kaasakiskuvamate perspektiividega. Lähemas tulevikus lendavad kosmonaudid teistele planeetidele. Kuidas sel juhul peetakse raadiosidet? Spetsialistid arvavad, et praegu, nende vahenditega, mis on juba raadiotehnika käsutuses, võib seda ülesannet lahendada. Selle tõendiks on edukas side olemasolevate radioelektrooniliste seadmete abil Maa ja planeetidevahelise automaatjaama «Mars-1» vahel.

Kuid raadiotehnika leiutab ju kahtlemata ka uusi vahendeid, ja juba neid ilmubki...

Otsiv mõte pürib veelgi kaugemale. Mitte enam kirjani-
kud-fantastid, vaid mitmete maade suured teadlased, seal-
hulgas ka nõukogude teadlased, esitavad projekte infor-
matsiooni vahetamiseks teiste kosmiliste «laiuste» arukate
olenditega. On tehtud näiteks ettepanek välja saata hulk
väikesi rakette magnetofonide ja raadiosaatjatega. Lenna-
tes tähtede ligiduses ja kasutades nende valgust energia-
allikana (päikesepatareide abil), hakkavad nad «män-
gima» üht ja sama linti, millele on võetud kõige tähtsa-
mad teated maapealsest tsivilisatsioonist. Võib-olla, kuul-
des seda «raadiosaadet», annavad teiste maailmade elani-
kud meile vastuse. Aga võib olla ka nii, et taolised raketid
juba kusagilt lendavadki meie poole...

Kuid missuguses keeles kõnelda kaugete planeetide
elanikega? Ka see küsimus seisab päevakorras. Nähtavasti
on see eelkõige matemaatika keel.

Nagu näeme, on ka siin kõige hulljulgemad plaanid seo-
tud raadiotehnikaga, elektroonika ja muidugi pooljuhti-
dega. Muide, need ei ole samad pooljuhtseadised, millest
oli juttu eespool.

Juba mitu aastat tagasi sai raadiotehnika üheks kes-
seks probleemiks kristallvõimendite uurimine ja täiusta-
mine. Ei möödunud päevagi, ilma et teaduslikes ja tehni-
listes ajakirjades ühel või teisel maal poleks ilmunud
artikleid pooljuhtide kohta. Ja tublisti pool nendest artik-
litest oli pühendatud transistoridele ning teistele pool-
juhtvõimenditele.

Võimendi tüüpide arv kasvas jõudsalt. Muidugi mitte
kõik ei pidanud vastu aja katsumusele, kuid ka neid, mis
omandasid «kodanikuõigused», on küllalt palju.

Jutustame siin vaid ühest, kuid niisugusest, mis nähta-
vasti hakkab etendama suurt osa raadiotehnika arenemi-
ses. Teda nimetatakse tunneldiodiks. Ärge imestage, et
kõneldes võimenditest, pöördume tagasi diodi juurde.
See diod on ebatavaline seade ja tal on võimenditega
kõige vahetum seos.

Te arvatavasti mäletate, kuidas töötab alaldi, mis koos-
neb kaht eri liiki pooljuhist — elektron- ja urvepooljuhist.
Nende eralduspinnal tekib energaetiline barjäär. Sõltuvalt
sellest, kuidas on ühendatud patarei poolused, võib väline
elektriväli kas barjääri veelgi kõrgemale tõsta — siis vool

läbi piirikihi tegelikult ei lähe — või, vastupidi, barjääri alandada, ja siis tekib vool.

Kuid mõnikord võtavad sündmused hoopis teise pöörde. Kõrge barjääri puhul, kui voolu veel olla ei tohiks, ta siiski eksisteerib ja on seejuures küllalt tugev. Oli aeg, millal niisugused nähtused viisid füüsikud kimbatusse. Kuid praegu on teada, ja me juba rääkisime sellest, et elementaarosakestel on ka laineomadused, millest tulenevadki näilised veidrused nende käitumises.

Kujutleme energetilist barjääri kõrge vallina. Sellest «üle ronida» elektronid (või urbed) ei suuda — neil ei ole küllaldaselt energiat. Kuid osutub, et nad on võimelised liikuma teisele poole üles «ronimata», minnes otse läbi barjääri, just nagu sellesse tunnelit rajades (siit ka efekti ja diodi enese nimetused — tunneleffekt, tunneldiod).

See sarnaneb nähtusega, kus valgus tungib läbi tuunja materjali, kui sellest on tehtud küllalt õhuke kile. Ja barjäär — tõkkekiht — peab tunneldiodis väga õhuke olema. Selleks viiakse mõlemasse pooljuhti — elektron- ja urvepooljuhti — rohkem lisandeid ja suurendatakse seega voolukandjate hulka tuhat, vahel ka miljon korda, võrreldes materjaliga, mida kasutatakse tavaliste diodide ja transistoride valmistamiseks.

Niisugune seadis enam alaldiks ei kõlba — vastuvool võib väga tugev olla. Ent kui välispinge lülitatakse sisse avasuunas ja seda nullist alates sujuvalt suurendatakse, kasvab vool diodis väga kiiresti ja saavutab suure tugevuse juba siis, kui tavalises diodis voolu veel tegelikult ei ole, kui pinge on üsna väike. Pärast seda vool väheneb, ja pealegi väga järsult, aga edasi kasvab uuesti, järkjärgult, nagu igas diodis.

See esimene voolu hüpe tekibki tunneleffekti tõttu. Eriti tähtis on asjaolu, et vool pärast maksimumini jõudmist hakkab vähenema. Selles karakteristika osas on tunneldiodil, nagu kõnelevad spetsialistid, negatiivne takistus. Just niisugune iseärasus lubabki seda võimendajana, generaatorina või elektriliste võnkumiste muundajana kasutada.

Tuletagem meelde transistoride peapuudusi: omamüra kõrge tase, temperatuuritundlikkus. Mõlemas suhtes on tunneldiodid võrratult täiuslikumad. Sellele tuleb lisada, et nad on mõõtmetelt väga väikesed ja tarbivad mitu

korda vähem energiat kui kõige ökonoomsemad pooljuhtseadised, vaakuumseadistest kõnelemata. Kuid see ei ole veel kõik: tunneldiodid on transistoridest märksa tundlikumad, nende võimendustegur on mitu korda suurem.

Esimesed tunneldiodid valmistati Jaapanis 1958. aastal, ja üsna peagi selgus, et need on erakordselt perspektiivsed, universaalsed seadised, mida võib kasutada mitmesugustes raadioskeemides.

Eriti kasulikud on nad arvutustehnikas. Tunneldioididel töötavaid arvuteid iseloomustab suur töökindlus, arvutuskiirus ja väga väikesed mõõtmed. Nagu on teatatud, luuakse Cambridge'i ülikoolis näiteks inimese peast väiksemat elektronaju, mis suudab minutis teha viissada miljonit operatsiooni.

Tunneldioiditaoliste uut tüüpi aparaatide loomine on vaid üks tee pooljuhttraadiotehnika täiustamiseks. Teine niisama tähtis külg on detailide ühendamine, monteerimisviis. Kui mitte ainult detektorite ja võimendajate, millest meil juttu oli, vaid ka igasuguste poolide, kondensaatorite, takistite jne., ühesõnaga kõikide raadiodetailide mõõtmeid järsult vähendada, ent monteerida aparaat vanaviisi, s. t. ühendada detailid lugematute traatidega ja joota nende otsad kokku, siis on see niisama hea kui siduda peni ankruketi külge.

Raadiotehnika vajas uut monteerimisviisi. Ja see loodigi — trükkskeemide meetod. Erilise voolu juhtiva värviga, mis sisaldab metallipulbrit, trükitakse isoleerplaadile korruga kogu vastuvõtja skeem. Jääb üle vaid lisada tillukesed seadised.

Käsijootmise tsehh on muutunud tegelikult trükikojaks. Muide, trükkskeeme valmistatakse ka teiste meetoditega: plaat kaetakse üleni lehtmetsalliga, seejärel aga söövitatakse tarbetu osa välja või kasvatatakse vajalik joonis galvaanilisel teel — metalli sadestamisega lahusest.

Järgmine samm vastuvõtjate tehnoloogia lihtsustamisel ja mõõtmete vähendamisel tehti, kui hakati «trükkima» mitte ainult ühendusjuhtmeid, vaid ka detaile endid: takisteid — grafiitristkülikuid või nikroomlatte, kondensaatoreid — metallääriseid kahel pool plaati jne.

Seejärel tekkis uus idee: valmismontaažiga standardsete mõõtmetega plaatidest, nn. mooduleist, hakata monteerima raadioaparatuuri põhilisi sõlmi, nii nagu maju ehitatakse plokkidest või raamat koostatakse poognatest.

Peagi hakati isoleerplaatide asemel kasutama õhukesi keraamilisi plaate, millele trükitakse kõik vajalikud detailid. Need plaadid kogutakse pakkideks, mis seejärel valatakse üle erilise vaiguga. Saadakse haruldaselt kompaktsed (kümned detailid ühes kuupsentimeetris!), vastu- pidavad ja töökindlad konstruktsioonid — mikromoodulid, nagu neid on hakatud nimetama, mis tänapäeval on juba raadioaparatuuri põhialuseks muutunud. Nad ei karda lööke ega põrutusi, on hästi kaitstud ümbritseva keskkonna eest ega ole nii tundlikud temperatuuri kõikumiste suhtes.

Kui me eespool kõnelesime raadioaparatuuri töökindlusest, oli kogu meie tähelepanu pööratud tema üksikosade töökindlusele. Sellelt seisukohalt on mikromoodulid tohutu samm edasi. Ent asjal on ka teine külg. Kui häired teki- vadki, siis on vaja, et neid kerge oleks leida, et lihtne oleks asendada rikkis detaile. See on samuti aparatuuri töökindluse tunnuseks. Ja selleski mõttes on mikromoodu- litel suuri eeliseid. Nad on kõik ühesugused, standardsed ja vigastatud plokkide asendamine toimub mõne minuti või isegi sekundi jooksul. Tõsi, ka trükkmontaaž võimaldab hõlpsasti asendada üksikuid «lehekülgi».

Ent juurdlev mõte tungis kaugemale. Milleks on vaja keraamilist plaati aluseks, mis võtab üksnes asjatult ruumi? Mispärast mitte monteerida kõik vajalik otse pool- juhitükile? Siis hakkab töötama kogu ruumala ja vastu- võtja või mõni muu aparaat vabaneb täielikult ballas- tist.

Taolise skeemi aluseks (seda nimetatakse jäikskeemiks) on räniplaat. Selle pinnale kantakse kõrgvaakuumis trafa- rettide komplekti abil metallikihid ühendusjuhtmete jaoks ja lisanditekihid detektorite, trioodide ja takistite moodus- tamiseks. Plaati kuumutatakse ahjus ja lisandid tungivad pooljuhti. Ahjus luuakse hapnikuatmosfäär, ja pooljuhi pinnale tekib oksüüdikiht — kondensaatori alus jne.

Üksikutel juhtudel on juba saavutatud kolossaalne tihe- dus ja kompaktsus — tuhat või isegi enam detaili ühe kuupsentimeetri kohta! Tuleb välja, et herneterasuurune transistor ei ole enam kääbus, vaid hiiglane: nüüd võib säärase mõõtmetega olla terve raadiovastuvõtja. Peamine aga on see, et niisugused skeemid osutuvad sadu kordi töökindlamateks kõikidest eelmistest

Jäikskeemides on juba raske eristada üksikosi. Nendeks on õhukesed kristallikihid, aine molekulide rühmad. See-

pärast nimetatakse uut astet raadiotehnika arenemises molekulaarseks elektroonikaks või lühendatult moletroonikaks.

On ka teine tee moletroonseadiste valmistamiseks — ei kasvatata erinevaid kihte pooljuhtplaadile, vaid luuakse üks liitkristall. Praegu tehakse selles suunas alles esimesi samme, kuid saabub aeg, millal raadiotehastes hakatakse kasvatama terveid elektron-urvesiirete kaskaade. Mõned siirded hakkavad täitma fotoelementide osa ja siis ei vaja tilluke kihiline kristall, mis on võimeline kinni püüdma raadiolaineid, mingisugust energiat peale valguse või siis raadiolainete eneste. Tänapäeval ei ole see enam fantastika.

Veel üks paljutöötav tee on avanenud raadiotehnika ees, eriti «kosmoseraadio» ees — kvantgeneraatorite loomine. Seni neid pooljuhtidest ei valmistata, kuid pole võimatu, et ka siin ütlevad oma sõna need suurepärasead materjalid.

Kuid ei tule arvata, et pooljuhtide ilmumisega lahkusid raadiolambid lavalt. Ei, vaakuumlampe üha täiustatakse ja mõnes suhtes on neil veel esikoht. Muuseas, pooljuhid on küllalt kallid — me nägime, milliseid pingutusi nõuab nende tootmine. Seepärast leidub tegevust ka vaakuumlampidele. Kogu maailmas töötab praegu üle kahe miljardi niisuguse lambi ja nad on küllalt mitmekesised — arvuliselt umbes kolmkümmend tuhat erinevat tüüpi. Ja ikkagi on magistraaliks radioelektronika arendamisel just pooljuhid.

ENNEOLEMATUD ELEKTRIJAAAMAD

Niisama tavaliseks tehiskaaslaste päraldiseks, nagu pooljuhttraadiovastuvõtja, sai päikesepatarei. Sellega varustati ka planeetidevahelised automaatjaamad — see, mis pildistas Kuu tagakülge, ja need, mis suunati Veenusele ja Marsile. Kosmonautide laevadele paigutatakse kahtlemata samuti taolised patareid, kui neil seisab ees pikk teekond: on ju Päike ainukeseks energiaallikaks planeetidevahelistes avarustes.

Päikesepatarei kargjas, mosaiikne plaat, mis koosneb üksikutest fotoelementidest, on imepärane, ainus omataoline elektrijaam, mis toodab voolu otse valgusest.

Tavaline tee päikesekiirtest kuni elektrilambini on kulukas ja vaevarikas. Taimelehtedes toimub kogu elusloodusele äärmiselt tähtis fotosünteesi protsess — keerukate orgaaniliste ainete loomine lihtsatest anorgaanilistest ainetest päikesevalguse energia abil. Siin muundub päikeseenergia keemiliseks energiaks, mis on elu allikaks nii taimedele endile, rohusööjatele, kiskjatele, kes õgivad rohusööjaid, kui ka lõpuks inimesele. Sellesama energia pärast toodavad inimesed sütt, naftat, maagaasi. Põledes annab kütus ära oma keemilise energia, mis seejuures muundub soojusenergiaks. Aurumasin või -turbiin muundab soojusenergia mehhaaniliseks ja alles sellest tekib generaatoris elektrienergia.

Kui palju astmeid, kui palju muundumisi! Ja iga astme, iga muundumise puhul tekivad paratamatult kaod. Piisab, kui öelda, et rohelised lehed kasutavad paremal juhul 1—2% nendele langevast päikeseenergiast ja pärast edasisi muundumisi jääb seda veelgi vähem järele. Pooljuhtidest fotoelement aga teeb sedasama ühe astme jooksul, muundades elektriks kuni 15% talle langevast kiirgusenergiast. Teisiti öeldes, fotoelemendi kasutegur ulatub 15%-ni. Ja ikkagi ei suuda ta seni maapealseid elektri jaamu asendada.

Iidsest ajast peale on inimesed unistanud päikesekiirte jõu alistamisest. Legendi järgi kasutanud antiikaja suur looduseuurija Arhimedes enam kui kaks tuhat aastat tagasi seda võimsat jõudu oma kodulinna Sürakuusa kaitsmiseks. Ta valmistanud hiiglasuured nõguspeeglid ja süüdanud päikesekiirte kimpudega linna blokeerinud roomlaste laevad. Paljude rahvaste legendides ja muistendites töötab Päike inimeste heaks.

Kuid seda unistust täide viia ei ole isegi meie ajal kerge. Päikesekiirte energia hajub õhus. Vaatamata sellele, et Päike saadab Maale tohtu hulga energiat, ei õnnestu seda kuidagi koguda. Väheldased seadised vee soojendamiseks ja toidu valmistamiseks, mis viimasel ajal on hakanud sooja kliimaga maades levima, püüavad kinni hoopis vähe päikeseenergiat. Võimsate seadmete jaoks on aga tingimata vaja suurt maa-ala. Selline on näiteks maailma suurim päikeseelektri jaam, mis projekteeriti meie riigis. Ta koosneb paljudest peeglitest, need püüavad laialdasele territooriumile langevaid päikesekiiri ja koondavad aurukatlale. Edasi aga toimub kõik nagu tavalises soojus-

elektrijaamas. Märgime muide, et energia muundamine ei ole siin suurt lihtsam kui enne, jääb ära vaid üks aste — keemiline energia.

Pooljuhtfotolemendid, nagu juba öeldud, lühendasid esmakordselt järsult teed Päikese juurest lambini. Kuid selleks et suurt võimsust saada, vajavad nad päratut territooriumi. Seni ei ole kosmilised päikeseplatereid kuigi suured. See on ka arusaadav: nad varustavad energiaga ainult raadioaparatuuri ja automaatikaseadmeid. Pika-ealistele Maa kaaslastele — igasugustele lendavatele meteoroloogiajaamadele, observatooriumidele, televisiooni ülekandejaamadele — piisab samuti väheldastest «päikese-püüdjatest». Aga lendavad kosmosejaamad, kus inimesed hakkavad lähirakettidelt ümber istuma kaugraketidele, või teaduslikud jaamad teistel planeetidel varustatakse juba võimsate ja seepärast hoopis suuremate päikeseplatereidega. Ning päris tohutud tulevad elektrirakettide platereid. On projekteeritud niisugused lennuaparaadid, mis pärast Maa atmosfäärist väljajõudmist laotavad laiaili hiiglaslikud fotoelementidest tiivad. Ja ka Maa peal, kui ehitada heliojaam kusagile Karakumi, peab see enda alla võtma kümneid või isegi sadu hektareid: ühelt ruutmeetritl võib saada võimsust ainult 100 vatti.

No las võtab, ütlete, ega's seal maast kahju ole! See on tõsi. Kui kõrbed päikeseplatereidega katta, saadakse terve ookean energiat! Ja isegi kõiki kõrbeid ei vajataks selleks, et inimkonda täielikult energiaga varustada. Alles mõned aastad tagasi rääkis väljapaistev prantsuse teadlane Frédéric Joliot-Curie: «Kui me vastava seadmestiku abil suudaksime kasutada kümmegi protsenti päikesekiirgusest, mis langeb Egiptusega võrdsele pindalale, siis niisugusel teel saadud energiahulk oleks võrdne energiahulgaga, mida käesoleval ajal toodetakse kõikides maa-des.»

Siiski on see praegu teostamatu idee. Fotoelemendid on kallid — neid valmistatakse ränist, tõsi küll, mitte nii puhtast, nagu läheb raadioseadiste tootmiseks, kuid siiski küllat kallist ränist. Sellepärast kasutatakse tänapäeval päikeseplatereid, kosmosest kõnelemata, ainult seal, kus ei ole tarvis suurt võimsust ja kus nad on hädavajalikud. Näiteks toodetakse portatiivseid raadiovastuvõtjaid auto-noomse toitega fotoelementide plaadilt. On konstrueeritud jõepaagid, mille järele ei ole üldse tarvis valvata — ei

kütusega tankida, ei süüdata ega kustutada, ja kantavad elektrivaibad geoloogidele, turistidele jne.

Kuid pooljuhtpäikesepatareid teevad alles esimesi samme. Kahtlemata — ja seejuures üsna pea — muutuvad nad nii paremaks kui ka odavamaks. Toome siin näiteks mõned teed nende täiustamiseks, mis on ära märgitud füüsikute ja inseneride poolt.

Te mäletate, et elektroni ergastusenergiat — seda energiaannust, mis suudab elektroni lahti rebida, teda vabastada — mõõdetakse keelatud tsooni laiusega. Erinevatel pooljuhtidel on see erisugune. Ränil moodustab ergastusenergia 1,1 elektronvoldiks nimetatavat ühikut. Päikese nähtav valgus koosneb mitmesugustest fotonitest, mille energiad vastavad kõikidele vikerkaarevärvidele, ja kõige suurema hulga nendest võiks kinni püüda materjal, mille keelatud tsooni laiuseks on 1,5 elektronvolti.

Kõikidest tuntud pooljuhtidest läheneb räni kõige enam sellele ideaalsele mõõdule. Sellepärast valmistataksegi fotoelemendid just ränist. Kui ränist kõik «välja pigistada» — vähendada energiakadusid muundumisprotsessis miinimumini, siis saadakse niisuguste fotoelementide kasuteguriks 22%. See arv, nn. teoreetiline kasutegur, näitab räni maksimaalseid võimalusi.

Viimaste aastate jooksul on paljude maade teadlased loonud uusi, tehispooljuhte, sealhulgas niisuguseid, mille keelatud tsooni laius on veelgi lähem ihaldatud suurusele 1,5 elektronvolti. Need on kaadmiumi ühendid väävli või telluuriga, indiumi ühendid fosforiga jt. Nende teoreetiline kasutegur on kõrgem, see läheneb maksimaalsele võimalikule väärtusele — 25%. Kolm protsenti ei olegi nii vähe, eriti kui kõnelda elektrienergia tootmisest suurtes mastaa-pides.

Kuid seda kõike ju tingimusel, et päikesepatarei kasutab vaid nähtavat valgust. Aga ultravioletsed ja infrapunased kiired? Kannavad ju nemad samuti päikeseenergiat. Kas ei saa ka neid elektriks muundada? Selgub, et saab, ja siis muutub fotoelementide kasutegur veel palju kõrgemaks.

On tekkinud idee ehitada kolmekihiline patarei, milles iga kiht kasutaks vaid üht osa päikesekiirgusest, lastes läbi kõik ülejäänud. Oletame, et ülemine kiht neelab vaid ultraviolettkiiri, keskmine — ainult nähtavaid, alumine — infrapunaseid kiiri. See eeldus ei ole aluseta. Ráni, millest

praegu valmistatakse patareisid nähtava valguse jaoks, laseb läbi pooled infrapunased kiired. Neid võib elektri muundada teine pooljuht. Kolmekihilise patarei teoreetiline kasutegur oleks juba 40%.

Kuid osutub, et seegi ei ole veel piir. Fotoelemendi materjali koostise võib valida sellise, et üheainsa kihiga kogub ta endasse kõik kolme liiki kiired. Kuidas nii? Aga sedasi. Pooljuhi enda keelatud tsoon muutub laiemaks, kui on vajalik nähtava valguse, seda enam aga infrapunaste kiirte jaoks. Tsooni laius hakkab vastama ultravioletse kiirguse kvantide energiale. Aga lisandite energiatasemed paiknevad kõrgustel, mis vastavad vähem võimsate kvantide energiale. Siis tõuseb fotoelemendi teoreetiline kasutegur 65%-ni.

Muidugi vajavad need variandid, eriti viimane, veel kontrollimist praktikas ja teostada neid ei olegi nii lihtne (juba üksi lisandite valik, mille tasemed peavad võtma rangelt kindlaksmääratud asendid, maksab midagi!), kuid avanev perspektiiv on erakordselt ahvatlev.

Võib täie veendumusega öelda, et lähemas tulevikus leiavad päikesepatareid kasutamist väikeenergeetikas — pumpade toitmiseks niisutussüsteemides, väiksemate majade valgustamiseks jne. Kui aga saavutatakse edu kas või üheski loetletud suundadest, siis võib heliotehnika — päikeseenergia kasutamise tehnika — muutuda üheks kõige tähtsamaks suurenergeetika haruks.

Kuid pooljuhtheliotehnika — see ei ole ainult päikesepatarei, vaid ka termogeneraator, veel üks «elektrijaam», mis muudab vooluks mitte valgust, vaid päikesekiirte soojust. Viimastel aastatel on paljudes lõunamaades nõukogude näitustel eksponeeritud meie maa teadlaste poolt konstrueeritud päikesefotopatareisid ja termogeneraatoreid ning kõikjal on nad alati tekitanud suurt huvi.

Päikesetermogeneraator kujutab endast väikest karpit, mis on kinnitatud umbes meetrise läbimõõduga nõguspeegli kohale. Karbis on komplekt termoelemente, mille ühtesid otsi soojendab päike, teisi aga jahutab voolav vesi. Säärane generaator annab ühe päeva jooksul nii palju elektrienergiat, et sellest piisab täiesti kahele 50-vatisele lambile 10 tunniks. Kui lambid põlevad 5 tundi päevas — rohkem lõunas ei ole vaja —, siis kindlustab termogeneraator koos akumulaatoriga, isegi kui pooled päevad aastas on sombused, väheldase maja valgustamise. Seda

enam kõlbab ta raadiovastuvõtja, väikese võimsusega sideseadmete jne. toitmiseks.

Kui niisuguseid päikeseseadmeid alles hakatakse kasutama, siis pooljuhttermogeneraatorid, mis saavad soojust teistest allikatest, töötavad juba võrdlemisi ammu. Sõja ajal võis partisanisalkades näha imepärast katelokki. Selles kees lõkke kohal vesi, kaks juhet aga viisid raadiovastuvõtja juurde. On selge, et kateloki seintes asusid termoelemendid, kuid tollal oli see tõepoolest ime: mitte elektrivõrgud, akumulaatorid ega patareid, vaid üksnes katelok varustas vastuvõtjat vooluga.

Katelok, samovar ja teised taolised seadmed olid maailma esimesed pooljuhttermogeneraatorid, mis loodi väljapaistva nõukogude teadlase akadeemik A. F. Joffe juhendamisel. Enne seda kasutati termoelemente vaid mõõteriistadena — temperatuuri kõikumisel muutub potentsiaalide vahe elementide otstel. Neid valmistati erinevatest metallidest ja nimetati termopaarideks. Sellest, et neid energiaallikatena kasutada, ei saanud juttugi olla: metalltermopaaride kasutegur ei ületanud 1—2%.

A. Joffe kinnitas juba 30—35 aastat tagasi, et termoelemendid osutavad teene just energeetikale, kuid selleks tuleb neid valmistada pooljuhtidest. Sügava läbinägelikkusega ennustas ta juba siis pooljuhtidele suurt tulevikku. Eriti südamelähedased olid talle termoelektrilised nähtused — ta lõi nende teooria ja juhtis esimeste uut tüüpi generaatorite konstrueerimist. Termogeneraator petrooleumilambil — geoloogide, turistide ja maakohtade jaoks, kus ei ole veel elektrit, seejärel termogeneraator petrooleumiahjul, — kolhoosidevahelise radiojaama jaoks, ahjul — valgustuse jaoks... Neid ilmus üha rohkem ja nad said laialdaselt tuntuks.

Viimastel eluaastatel esitas A. F. Joffe veel ühe suurepärase voolugeneraatori tüübi. Seejuures lähtus ta vajadusest ületada tavaliste termoelementide peamised puudused.

Kahtlemata torkas teile silma, et igas termogeneraatoris tuleb üht jootekohtade rühma jahutada. Päikesegeneraatoris teeb seda näiteks voolav vesi. Katelokis aga, muuseas, jahutab keev vesi. Imelik? Muidugi ei ole see kõige parem jahutusviis, kuid see-eest kindel ja lihtne. Kuni katelokis on vett, ei tõuse temperatuur elemendi sissepoole pööratud otstel üle 100°. Mõnes generaatoris

kasutatakse õhkjahutust — eenduvad ribad nagu küttepatareiski suurendavad elemendi ja õhu kokkupuutepinda ning soodustavad soojuse ärajuhtimist.

Aga mispärast on jahutamine nii vajalik? Sellepärast, et termoelement, nagu igasugune soojusmasin, töötab seda paremini, mida suurem on temperatuuride vahe — antud juhul kuumade ja külmade kihtide vahel. Aga siin ei ole seda kerge säilitada. Asi on selles, et kuumadele jootekohdadele saabuv soojus kulub mitte ainult elektrienergia tootmiseks — uute elektronide ja urvete moodustamiseks. Kahjuks annab pooljuht ise küllalt palju soojust kuumadelt jootekohtadelt külmadele. Põhjuseks on aine soojusjuhtivus, või lihtsamalt öeldes, osakeste — aatomite ja üksikute elektronide soojusliikumine. Ja see alandab termoelemendi efektiivsust. Häda ei ole selles, et on vaja jahutada, vaid selles, et palju soojust läheb asjatult kaduma.

Ja A. F. Joffe tegigi ettepaneku üldse loobuda aatomitest. Jaa, jaa, teha nii, et elemendi kuumade ja külmade otste vahel ei oleks üldse aatomeid. Aga mis seal siis on? — küsite. Aatomite killud — elektronid ja ioonid, teisi öeldes, plasma. Sellisel juhul kandub soojus kuumalt otsalt külmale ainult kiirgusena ja seega on ka soojuskadu tunduvalt väiksem. A. F. Joffe esitas plasmaelemendi idee ja töötas välja ka selle teooria.

Mida siis kujutab endast plasmaelement? Töötamispõhimõttelt meenutab ta diodi — kahe elektroodiga vaakuumlampi. Kuid seal soojendab elektrone emiteerivat katoodi vool, siin aga mingi soojusallikas. Seal on katoodi ja anoodi pindala väike, siin aga suur. Seal ei vajata suurt voolutihedust, siin aga küll — ei ole see ju raadioelektroonne, vaid energeetiline seadis.

Suurt voolutihedust on raske saavutada, kui katoodi ja anoodi vahel on vaakuum: katoodist väljalennanud elektronid, mis pole veel anoodini jõudnud, tõukavad oma ühise laenguga (seda nimetatakse ruumlaenguks) järgmised partiid elektrone eemale ja nõrgendavad voolu. See pärast täidetakse elektroodidevaheline ruum tseesiumiaurudega. Tseesiumi aatomid, mida elektronid pommitavad, ioniseeruvad kiiresti — kaotavad elektrone ja muutuvad positiivseteks ionideks, mis nõrgendavad elektronide ruumlaengu toimet. Niiviisi tekib seadises elektronide ja ionide (ja võib-olla veel tervete, ioniseerumata tseesiumi-

aatomite) segu, mida nimetataksegi plasmaks. See on veel üks plasma- või termoelektronelemendi erinevus vaakuumdiodist.

Konstruksioonilt kujutab plasmaelement endast kahekordsete seintega õõnestoru. Tema sisemine sein on katoodiks, välimine — anoodiks, nende vahel asub plasma. Niisugune element töötab hästi, kui katoodi temperatuur on kõrge — 2000—2500 kraadi. Pooljuhttermoelement aga ei talu rohkem kui 700—1000 kraadi. Teadlased otsivad visalt kuumakindlaid materjale termoelementide jaoks. Ongi juba saavutatud lootustandvaid tulemusi, kuid seni on veel vara rääkida otsingute edust. Praegu kardavad termogeneraatorid veel liiga kontsentreeritud soojusvoogu. See on samuti nende puuduseks. Ja ka sellest aitab vabandada plasmaelement.

Kuid ise ta ei muuda elektriks kogu temani tulevat soojust. Antakse ju osa soojust ikkagi edasi anoodile. Kuidas kasutada ära neid jääke? Muidugi termogeneraatori abil. Ja siin avaneb võimalus luua erakordselt efektiivne «kahekaskaadiline» generaator — plasma- ja pooljuhtgeneraator ühes tükis. Esimene, plasmakaskaad, võtab endale «kuumema» osa saabuvast soojusenergiast, teine, pooljuhtkaskaad, aga ülejäänud, «külmema» osa. Niisugune termogeneraator hakkab kasulikult ümber töötama võibolla poolt kogu temani jõudvast soojusenergiast. Näete, missuguseks kujuneb kasutegur!

Kahekaskaadiliste generaatorite esimesed näidised, seni, tõsi küll, madala võimsusega ja muidugi väikese kasuteguriga, on juba mõnel maal loodud. Plasmaelemendi toru vastu on väljastpoolt surutud termoelementide kuumad otsad, nende külmad otsad aga toetuvad veel ühele õõnsale torule, kõige välimisele, mida mööda ringleb vesi. Niisuguse liittermogeneraatori soojusallikaks võib olla kuumade gaaside juga, mis väljub näiteks kosmoselaeva rakettmootorist.

Viimasel ajal võtavad paljude maade teadlased aktiivselt osa voolugeneraatori ühe kõige uuema tüübi — magnetühdrodünaamilise generaatori konstrueerimisest. See töötab samal põhimõttel mis dünamomasingi — vool viiakse selleni juhi kaudu, mis liigub magnetväljas, kuid metalljuhtme osa täidab siin kuuma ioniseeritud gaasi juga. Niisugusel generaatoril on palju eelseid. Üksikajaliselt sellest jutustada ei ole siin võimalik, kuid tähtis

on märkida, et generaatorist väljuv, juba oma töö sooritanud gaasijuga on veel väga kuum — 2100°. On olemas mitmesuguseid projekte selle soojuse kasutamiseks. Üks võimalikest näeb ette magnethüdrodünaamilise generaatori ühendamise kahekaskaadilise termogeneraatoriga.

Teistel juhtudel ei ole heitgaaside juba, mis väljub näiteks automootorist, nii kuum. Siis ei ole vajadust liittermogeneraatori järele — piisab ühest pooljuhtgeneraatoristki. Niisugused konstruktsioonid on samuti juba loodud. Heitgaaside toru ümbritsevad termoelemendid. Need ei ole mitte neljakandilised, vaid rõnga- või lehtrikujulised, kokku joodetud vaheldumisi kitsa ja laia küljega. Termoelementide ümber aga paikneb veesärk.

Nüüd võimaldavad pooljuhttermogeneraatorid — kas ise või koos plasmageneraatoritega — kasutada ära peaaegu kogu soojuse, mida mootorid, tehaste katlamajad jne. asjatult õhku paiskavad. Aga see soojushulk moodustab peaaegu 80% kogu maakeral põletatava kütuse energiast! Neli viiendikku kaevurite, transporditöölise, energeetikute tööst, neli viiendikku päikesekiirte energiast, mille on «konserveerinud» möödunud epohhide taimed, lendab sõna otseses mõttes korstnasse — tehase-, vabriku-, ahjukorstnatesse... Ja kõik sellepärast, et inimesed ei oska veel peremehelikult kasutada oma rikkusi. Olukorda aitavadki parandada pooljuhid, seejuures imetlusväärset lihtsal ning hõlpsal viisil. Termogeneraatorid, millel ei ole liikuvaid ega hõõrduvaid osi, mis ei nõua hoolitsust ega järelevalvet, annavad inimesele terve ookeani lisaenergiat ega tekita erilist tüli.

Selleks tuleb termogeneraatoreid muidugi veel täiustada — muuta nad vastupidavamaks, tõsta nende kasutegurit. Praegu on see 10—15%, teoreetiliselt aga võib tõusta 30%-ni või isegi üle selle. Kui aga leitakse kõrgeid temperatuure taluvad pooljuhid, siis on täiesti tõenäoline, et ei vajata ka plasmaelemente, ja see teeb ülesande muidugi palju lihtsamaks, sest vaakuum- või gaasiga täidetud (nagu praegusel juhul) seadised on alati kapriissemad ning vähem töökindlad pooljuhtseadistest.

Ent ka sellega ei ole pooljuhtenergiamuundajate perspektiivid veel ammendatud. Nii fotoelementidel kui ka termogeneraatoritel seisab ees ülesanne muuta tuumaenergiat vahetult elektrienergiaks. Fotoelemendid on suute-

telised «toituma» niihästi valgusest kui ka tuumakiirgusest. Termoelemendid hakkavad võtma soojust «kuumadelt» tuumakütuse varrastelt.

Tänapäeva aatomielektriijaam erineb põhimõtteliselt vähe tavalisest soojuselektriijaamast. Ainult energia muundumiste pika ahela algus on siin teistsugune: selle allikaks ei ole mitte keemiline, vaid tuumakütus. Kui aga heita kõrvale kõik, aurukatlast alates, ja asendada pooljuhtidega, siis saab elektrit otse reaktorist. Niisugusesse elektriijaama ei jää ühtegi-masinat. Aja jooksul hakkavad taolised jaamad töötama lukustatuna — ilma inimesteta ja järelevalveta — aastakümneid, kuni jätkub tuumakütust.

Hiiglaslikke, tohutu tähtsusega ülesandeid seab meie teaduse ette Nõukogude Liidu Kommunistliku Partei programm. Üks esimesi nende hulgast on «uute energiaallikate avastamine, selliste meetodite avastamine, mille abil saab soojus-, tuuma-, päikese- ja keemilist energiat otsest muundada elektrienergiaks». Kas on tarvis kõnelda sellest, kui suur on nende ülesannete lahendamisel pooljuhtide uurijate osa!

UUED LAHENDUSED, UUED ÜLESANDED

Kui suured termoelementide võimalused energetikas ka ei oleks, etendavad nad tänapäeval hoopis tõhusamat osa teisel alal — väga mugavate, kohati täiesti asendamatu jahutus- ja soojendusaparaatidena. Kui läbi termopatarei voolu lasta, siis hakkab üks rühm jootekohti jahutama, teine soojenema. Kui külmad jootekohad asuvad mingi karbi sees, kuumad aga väljaspool, saadakse väike külmutuskapp. See võib olla igasuguse suurusega, isegi õige tilluke — mahuga 1—2 kuupsentimeetrit. Ja just väikesed pooljuhtkülmutuskapid on eriti väärtuslikud.

Kujutage endale ette plekkmannergut, millega pere-naised käivad piima toomas, ainult et selle küljed on üleni kaetud ribidega nagu kütteradiaatoril. See on põllumajandusele vajalik portatiivne külmutuskapp bioloogiliste preparaate säilitamiseks. Vooluga varustab seda põhja sisse monteeritud väike akumulaator. Kuidas muidu saaks teha niisama kergelt ja töökindlat külmutit? Mitte mingil viisil.

Ja mitte ainult seda laadi kantavad seadmed ei paista silma oma väärtuslike omaduste poolest.

Kui ehitada pooljuhtidest suur külmutuskapp, kas või tubane, siis on see niihästi imetlusväärset lihtne oma konstruktsioonilt — tal puuduvad jahutusvedelik ja mootor — kui ka äärmiselt pika eaga — niisuguse režiimi puhul, ilma tugeva kuumenemiseta, töötab pooljuht väga kaua, samuti on ta erakordselt vastupidav — ei karda mitte mingisuguseid põrutusi. Kuid seejuures ei ole ta küllalt ökonoomne. Sellepärast pole niisugused külmutuskapid seni veel konstrueerimisstaadiumist välja jõudnud. Ent väike külmutuskapike on juba tänapäeval väljaspool igasugust konkurentsi! Tavaliste külmutusmasinate võimsuse vähenemisel nende kasutegur langeb, pooljuhtmikrokülmuti aga on mitte ainult lihtsam, pikemaajaline, vastupidavam jne., vaid ka ökonoomsem kui tavaline külmuti.

Niisugused seadmed töötavad juba väga mitmesugustes kohtades — observatooriumidest kuni kliinikuteni. Väike külmuti kaitseb soojenemise eest tundlikku elementi vaatlussüsteemis, mis «juhib» teleskoopi tähe kannul kogu öö, või radioaktiivses indikaatoris, mille geoloogid lasevad puurauku maa-aluste varade otsinguil. Mõlemad seadised töötavad palju paremini madalal temperatuuril, ent kuni pooljuhtmikrokülmutite ilmumiseni oli vajalike tingimuste loomine liialt keerukas. Meedikutel aitavad miniatuursed külmutid — omapärased plaastrid — ravida mõningaid haigusi, kus on tarvis pika aja jooksul jahutada mingit naha osa.

Kui patarei poolused ümber lülitada ja läbi termoelementide kulgeva voolu suunda muuta, siis vahetuvad kuumad ja külmad jootekohad ning külmuti muutub soojendiks. See võimaldab valmistada suurepärase seadme, milles alati säilib püsiv temperatuur: tõuseb see normist veidi kõrgemale, algab jahutamine, muutub aga liiga külmaks, lülitub sisse soojendi.

Metallkarpi, mille maht on kõigest 2—3 kuupsentimeetrit, aga kui vaja, siis ka suurem, suletakse temperatuurikõikumiste suhtes tundlikud raadioosad. Ja siis töötab kogu aparatuur täiesti häireteta isegi väga rasketes tingimustes. Eespool oli juttu, et soojakartus on transistoride puuduseks, millest võib veel jagu saada. Pooljuhtmikrotermostaat, mis suudab säilitada määratud temperatuuri kraadi murdosadesse küündiva täpsusega, annabki niisu-

guse võimaluse. Kui jutt on lennuki, raketi, kosmoselaeva raadioaparatuurist, kus peamiseks nõudeks on kompaktsus ja kergus, siis osutub pooljuhtmikrokülmuti ainukeks kõlblikuks vahendiks. Täpselt samuti säilitatakse kindel temperatuurirežiim paljude teiste detailide puhul arvutus-, kontrollimis- ja juhtimissüsteemides.

Tuleb veel kord rõhutada, et kõikidel juhtudel, kui on tarvis kas jahutada, või nagu öeldakse, termostateerida väikesi objekte, on pooljuhitud täiesti asendamatud. Kui aga rääkida mitte jahutamisest, vaid püsiva temperatuuri säilitamisest, eriti aga soojendamiseks, siis on pooljuhtseadmed juba tänapäeval kasulikud ka suuremas ulatuses.

Kujutage endale ette mitu korda — kuni elutoa mõõtemeteni — suurendatud mikrotermostaadi kambrit. Kuumaga läheb toa jahutamine termoelementide abil, nagu juba öeldud, mõnevõrra kallimaks kui tavalise jahutusseadmega, ent seevastu toa soojendamine külma ilmaga on hoopis kasulikum kui igal muul viisil. Ja vaat mispä-rast.

Termoelemendid soojenevad pisut voolu mõjul, samuti nagu iga tavaline elektrisoojendi, kas või elektripliidi spiraalgi. Ent kui seal kogu soojus saadakse ainult niisugusel teel, siis siin moodustab see vaid osa ja pealegi kõige vähem soovitava osa. Termoelementide peamine efekt, kui nendest voolu läbi lastakse, seisab soojuse ülekandumises külmadelt jootekohtadelt kuumadele. Külmal jootekohtadel, nagu me juba teame, tekivad elektronid ja urbed. Selleks kulub pooljuhi enda osakeste soojusliikumise energiat, mistõttu pooljuht jahtubki. Jahtudes aga hakkab ta koguma endasse soojust ümbritsevast ruumist. Kui see ruum kujutab endast külmuti kambrit, siis näib protsess meile täiesti selgena. Aga kui niisuguseks ruumiks, kuhu on pistetud külmad jootekohad, osutub tänav, siis hakkavad termoelemendid soojust välisõhust tупpa pumpama — tänav hakkab kütma maja!

Ja isegi kui õues on talv, on majas seintelähedase õhu täiendava jahutamise arvel ikkagi soe. Külmast välisõhust ammutatud priisoojus võib moodustada tublisti poole soojusest, mida eritavad tупpa paigutatud kuumad jootekohad. Muidugi, ka selle soojuse hankimiseks tuleb kulutada elektrienergiat ja mitte igal juhul ei osutu termoseade lõppkokkuvõttes ökonoomsemaks tavalisest soojendist. Kuid viimastel aastatel on nõukogude teadlased

välja töötanud ning konstrueerinud niisugused seadmed ruumide kütmiseks ja õhu konditsioneerimiseks, mis juba praegu on rentaablid meie maa lõunarajoonides. Sellest oli üsna hiljuti juttu Leningradis toimunud spetsiaalsel termoelektrilasel nõupidamisel, millest võtsid osa välja- paistvad teadlased Nõukogude Liidu mitmesugustest linnadest.

Aga alles mõni aeg tagasi kujutati taolisi aparate ette vaid tulevikuna ja võib-olla isegi kaugel tulevikuna. Liialt kummalisena näis siiski mõte kütta maju tänavasoojusega. See on veel üks näide pooljuhtide füüsika ja tehnika hoogsast arenemisest. Muide, seda laadi näiteid võib tuua ükskõik kui palju.

Mitte väga lähedase perspektiivina paistis hiljuti ka võimalus kasutada ränialaldeid raudteetranspordis — küllalt hästi teati raskusi puhta räni saamisel. Samal ajal oli see idee iseenesest äärmiselt ahvatlev. Asi on selles, et elektriveduri mootorid vajavad alalisvoolu, elektrijaamad aga annavad vahelduvvoolu. Seepärast ehitati varem piki elektriraudtee liine rida alaldusalajaamu. Kui aga oleks võimalik juhtmesse rööbaste kohal anda vahelduvvoolu, lihtsustuks liinide ehitamine ja kokkuhoid oleks tohutu. Selleks on vaja alaldi vahetult elektrivedurile paigutada. Esimene katse probleemi lahendada oli järgmine: hakati välja laskma uut tüüpi elektrivedureid elavhõbealalditega «pardal». Selliseks elektriveduriks oli näiteks N-60, mida toodeti Novotšerkasski tehases. Kuid elavhõbelamp on kogukas, õrn ning mitte küllalt töökindel. Ja just siin läkski tarvis võimsaid ränialaldeid — praegu on neid juba laialdaselt praktikasse rakendatud.

N-62 — nii nimetatakse järgmist elektriveduri mudelit, mis valmis sellesamas Novotšerkasski tehases. Nimetuselt erineb ta eelmisest, nagu näeme, ainult ühe, viimase numbriga. Ent selles numbris ongi kogu saladus — uuele elektrivedurile paigaldati teeklaasist väiksemad ränialaldid. Paarkümmend niisugust elementi asendavad inimesekõrgust elektrilampi. Elektriveduril on suurem võimsus, kõrgem kasutegur ja väiksem kaal. Ja tal on veel üks eelis: «elavhõbekad» ei tohi soojeneda üle 35—45°, seepärast varustatakse neid küllalt keeruka jahutussüsteemiga, ränielemendid aga vajavad üksnes lihtsat ventilaatorit.

Meie maal on ehitatud ka linnalähi-elektrironge, mil-

lele paigutati ränialaldid. Neil on samuti märkimisväärseid eeliseid ja nad ületavad analoogilisi näidiseid, mis on viimasel ajal loodud välismaal.

Seega on raudteede elektrifitseerimine vahelduvvoolul reaalsuseks muutunud. Nõukogude Liit on maailmas esikohal elektrifitseeritud raudteeliinide ulatuse ja elektrifitseerimise tempo poolest. Mõnes suures ja kõige kõrgema veoste pingega lõikudes on uus süsteem juba kasutusele võetud. Iga aastaga, iga kuuga ulatub üha kaugemale rööbaste kohal kontaktjuhtmete võrk, mida mööda kulgeb vahelduvvool.

Pooljuhtalaldeid valmistatakse mitte ainult ränist, vaid ka germaaniumist, seleenist, vaskalahapendist. Viimasest — kuproksalalditest — oli meil juba juttu seoses alaldava siirde uurimislooga. Kõiki neid seadiseid kasutatakse väga mitmeti — akumulaatorite laadimisel, elektrikeevituses, automaatikas, eriti automaatblokeeringus raudteedel.

Kui aga juba automaatikast rääkida, siis on siin esikohal teised pooljuhtseadised. Eelkõige on need fototakistid ja fotoelemendid, mis, nagu teame, reageerivad erksalt valguse toimele. Koos elektromagnetilise lülitiga, releega, moodustavad nad väga levinud automaatseadme — fotorelee.

Pimeduse saabudes süüdatakse linnades ja asulates elektrilambid. Paljudes kohtades ei hoolitse selle eest enam inimesed — neid vabastas fotorelee. Kusagile posti otsa või kõrge maja katusele on paigaldatud väikese mündi suurune seadis, millel on ümmargune kest klaas- või plastmasskatusega. Kestas on aga pooljuhtkristall. Nõrgeneb valgus, nõrgeneb ka vool fotorelee ahelas, ja teatud hetkel süttib tänavatel «iseenesest» valgustus.

Paljudes tehastes nõuavad tootmistingimused püsivat, ühtlast valgustust. Selle eest hoolitsevad samuti fotoreleed. Kui ilm on sombune, hoiavad nad hommikust peale päevavalguslambid sisselülitatuna, kui aga hakkab paistma päike, lülitatakse lambid välja, ja pealegi ainult need, mis ei ole vajalikud! Vähe sellest, et lisakohustustest vabanes inimene, saavutatakse ka märgatav elektrienergia kokkuhoid.

Sageli nõutakse säärastelt seadmetelt erilist tundlikkust. Sellistel puhkudel on asendamatud fototakistid: pimeduses ei juhi nad üldse voolu, valgustamisel aga suu-

reneb nende juhtivus vahel miljoneid kordi. Tuleb märkida, et tolle tähtsa tehnikaala arendamisel on Nõukogude Liit teistest maadest ette jõudnud.

Teiseks suureks pooljuhtseadiste rühmaks automaatikas on termistorid ja termopaarid. Kui meil oli juttu sellest, et termostaadis lülitakse vajalikul hetkel vool ümber ja jahtumine asendub soojenemisega või vastupidi, siis võis loomulikult tekkida küsimus: aga kuidas see siis toimub, kes jälgib temperatuuri kõikumisi? Tuleb välja, et termostaati asetatakse veel üks tilluke pooljuhtseadis — termotakisti ehk termistor. Tegelikult on see tilluke pooljuhitükike, mis temperatuuri vähimagi kõikumise puhul muudab märgatavalt oma juhtivust. Voolutugevuse suurenemisele või vähenemisele, samuti nagu fotoreleeski, reageerib elektromagnetiline lüliti.

Mõõtmelt on termistor hoopis tilluke — ta on nõõpnõelapeast tunduvalt väiksem. Paljudel juhtudel tuleb ta sulgeda klaas- või metallkesta, kuid ka siis ei ületa termistori mõõtmed mõnda millimeetrit, kõige rohkem sentimeetrit. See märkamatu seadis täidab mitmesuguseid, sageli väga vastutusrikkaid ülesandeid.

Ta jälgib temperatuuri niihästi termostaatides kui ka laevakajutites, inkubaatorites, elevaatorites, turbiinide kandelaagrites... Kui termistori kõrvale asetada soojusallikas, pisike soojusspiraal, siis on meie seadis võimeline registreerima teda uhtva gaasijoa või vedeliku kiirust ja arvestama isegi nende kulu. Kui juba voolab aeglasemalt, juhitakse soojust spiraalilt halvemini ära ja termistor soojeneb. Juba hakkab voolama kiiremini, ja termistor jahtub. Termistoriga ühendatud galvanomeetri võib gradeerida otse gaasi või vedeliku mahuühikutes — ja oma pärane arvesti ongi valmis.

Mitmesugust tüüpi termistore on tohtul hulgal ja nii-sama mitmekesised on nende ülesanded. Eriti tähtsat osa täidavad termistorid teaduslikes uurimistes. Pooljuhterakest võib asetada ükskõik kuhu, isegi looma kehasse, ja ta annab õpetlastele huvitavaid andmeid. Kuid sageli eelistatakse nii tööstuses kui ka teaduses mitmesugusteks mõõtmisteks kasutada mitte termistori, vaid pooljuhttermopaari või termoelementi. Sellel seadisel, nagu teame, on suur eelis — ta ei vaja välist vooluallikat.

Mõni aeg tagasi tehti järgmine huvitav katse. Katsealuste kasside ajju viidi peened terasnõelad, mille sees

olid termoelemendid. Need ei seganud loomi ega muutnud põrmugi nende käitumist. Nõeltest kulgesid galvanomeetrite juurde peened traadid, mis ei takistanud kasside liikumist. Niisugusesse asendisse jäid seadised ligikaudu aastaks ja kogu selle aja jooksul andsid nad teateid verevoolu intensiivsusest ajus. Teadlased said uusi huvitavaid andmeid kõikvõimalike elusituatsioonide mõjust organismi sisemisele seisundile.

Termistoridel ja termoelementidel on üks oluline puudus — nad kardavad ülekuumenemist. $300\text{--}500^\circ$ — see on nende tavaline piir. Kõrgemate temperatuuride mõõtmiseks kasutatakse nagu ennegi metalltermopaare. Kahe metalli kokkupuutumisel tekib kontaktpinge ja nende jootekoha soojendamisel tekib külmadel otstel pinge. Ent see pinge on mitu korda väiksem kui pooljuhtidel, mistõttu ka seadis ise on hoopis vähem tundlik. Samal põhjusel ei saa valmistada metallist termoelemente energia-seadmetele.

Eespool oli juba juttu, et viimastel aastatel on avastatud mõned kuumuskindlad materjalid termoelementide jaoks. Edukalt otsitakse ka materjale termotakistitele. Üsna hiljuti ilmusid teated välismaistest termistoridest, mis töötavad temperatuuridel üle 1000° . Nõukogude teadlased töötavad samuti taoliste seadiste loomisel, kavandades veelgi kuumuskindlamaid termoelemente — nende «lagi» oleks $1800\text{--}2000^\circ$.

Temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse peale termistoride ja termoelementide veel paljusid teisi, sageli ootamatuid seadiseid. Nii tehti hiljuti katsed valmistada transistortermomeetrit. Transistori sõltuvus temperatuurist, mida seni üksnes puuduseks peeti, muutus siin väärtuslikuks omaduseks ja sai isegi aluseks uue seadise loomisel. Kuid kõige levinumad, kõige mitmekesisemad seadised sellest rühmast niihästi ehituselt kui ka ülesannetelt on ikkagi termistorid.

Need kuuluvad nõndanimetatud hapend- ehk oksiid-pooljuhtide (ladinakeelsest sõnast *oxygenium* — hapnik) hulka ja juba see nimetus ütleb, et nad koosnevad hapenditest — metallide ja hapniku ühenditest. Termistoride valmistamiseks kasutatav materjal sisaldab tavaliselt kahe-kolme eri metalli, näiteks titaani ja magneesiumi, nikli ja mangaani, mangaani, nikli ja koobalti hapendeid, mõnikord ühe ja sama metalli mitut eri hapendit või

hapendite kombinatsiooni mõnede teiste ühenditega. Valides teatud koostisega kompositsiooni (nii nimetavad seda spetsialistid), saadakse vajalike omadustega termistor.

Termistoride elektrijuhtivusel on pisut teistsugune mehhanism kui niisugustel pooljuhtidel, nagu germaanium ja räni. See on tingitud kristallide erinevast ehitusest. Germaaniumi ja räni kristallis on kõik aatomid ühesugused ja igaüks, nagu juba öeldud, «hoiab kinni» neljast naabrist. Hapendpooljuhi kristall aga koosneb erinevatest aatomitest, õigemini, erinevatest ioonidest, sest metalli ühine misel hapnikuga annab esimene teisele oma välised, valentselektronid, ja mõlemad muutuvad ioonideks: metalli aatom positiivseks iooniks, hapniku aatom negatiivseks iooniks. Seejuures omandab suure tähtsuse nende vastastikune asetus kristallis.

Tinglikult kujutatakse ioone kerakestena. Suuremad, hapnikuioonid, asuvad kristallvõres tihedalt üksteise kõrval, iga kõrgemal olev kiht on just nagu süüvinud lohku madalamal paiknevate kerakeste vahel. Nende kerakeste vahemikes asetsevad väiksemad, metallide ioonid. Viimased ei hõiva mitte kõiki vahemikke, osa neist jääb tühjaks. Ent kõige tähtsamaks osutub midagi muud: metallide ioonid on erinevates asendites, sest suurte kerakeste vahemikud ei ole ühesugused. Osa neist on moodustatud kuue, osa nelja hapnikuiooni poolt. Esimesi on vähem, kuid just nemad etendavad siin peamist osa. Lugu on selles, et väikesed vahemikud on laiali paisatud, suured aga ühinevad tervet kristalli läbivateks pikkadeks ridadeks. Just neid teid mööda toimubki niisuguses kristallis elektrijuhtivus: eraldunud elektronid liiguvad ioonilt ioonile, siin ei saa nad rännata vabalt kogu kristalli mööda, nagu germaaniumis või ränis.

Kuid kõik oleneb sellest, missugused ioonid asetsevad suurtes vahemikes: kui erinevate metallide ioonid, siis on elektronide külg raskendatud, kui aga ühe, ent niisuguse metalli ioonid, mis on võimeline kiiresti muutma oma valentsi, soodustab see elektronide liikumist. Sellisel juhul annavad ioonid meeeldi elektrone ära ja võtavad neid vastu — just nagu «vahetavad» neid. Niisuguste siirdmetallide hulka (nagu neid nimetatakse) kuuluvad raud, titaan, mangaan. Termistoride valmistamiseks kasutatavate oksiidpooljuhtide koostisse kuulub tingimata mõni nendest metallidest. Kui termotakisti ioonid paikne-

vad korrapäraselt, võib ta hästi elektrit juhtida. Just seda ongi vaja: siis liiguvad elektronid soojenemisel, mil nad palju sagedamini ioonidest eralduvad, takistamatult ja vool võib järsult suurenedä.

Teisiti on lugu materjali valmistamisel ferriitide, uute magnetiliste materjalide jaoks. Need kuuluvad samuti oksiidpooljuhtide hulka ja neil on samasugune struktuur, kuid nendelt nõutakse otse vastupidist — võimalikult väikest elektrijuhtivust. See on tingitud järgmisest asjaolust.

Tavalised püsivmagnetid tehakse rauast, koobaltist, niklist, nõndanimetatud ferromagnetilistest metallidest (ladinakeelsest sõnast *ferrum* — raud). Nendest valmistati alles hiljuti ka kõik elektromagnetite südamikud. Südamik magnetiseerub ja suurendab mitu korda mähise magnetvälja tugevust. Kuid niisugune südamik osutub otstarbekaks ainult alalisvoolu puhul, vahelduvvoolu korral on ta kõlbmatu — südamikus tekivad kahjulikud pöörisvoolud, mis seda soojendavad (selleks raisatakse elektrienergiat) ja nõrgendavad põhimagnetvälja. Sellepärast hakati vahelduvvoolu jaoks südamikke valmistama õhukestest lehtedest — «kihtidest» ja isegi peenikesest rauapurust, mida kinnistatakse mingi isoleeriva massiga.

Niiviisi õnnestus valmistada südamikke, mis on kõlblikud isegi raadiotehnikas. Kuid vajadus uue magnetilise materjali järele muutus üha teravamaks seoses väga suurte sageduste kasutuselevõtuga. Saabus hetk, mil tavalised südamikud muutusid kasutuks. Ja siis astusid platsi ferriidid. Et suurtes vahemikes paiknevad erinevate metallide ioonid, siis on ferriitide elektrijuhtivus tühine (ka mitte mingisugune soojendamine ei suurenda seda!) ja kahjulikud pöörisvoolud on peaaegu välistatud. Aga ferriitide magnetilised omadused ei ole põrmugi halvemad kui metallidel.

Ferriitsüdamikud ja -antennid on muutunud raadiotehnikas niisama tavalisteks nagu transistorid ja kristalldioodid. Ferriitrõngastest valmistatakse ka elektronarvutite magnetilisi «mälusid», kontaktideta lülitite südamikke ja paljusid teisi väga tähtsaid detaile.

Niiviisi tõrjusid pooljuhid metallid välja viimaste näiliselt põliselt «pärusmaalt». Ent tuleb olla õiglane: «vattisaid ka isolaatorid. Ferriitide lähedane sugulane sisemiselt ehituselt — baariumtitaanaat (baariumi ja titaani

ühend) — osutus parimaks kõikidest teistest dielektrikutest. Materjali, mille kunstlikult valmistasid nõukogude teadlased, on hakatud eriti laialdaselt kasutama. Sellest tehakse raadiotehnilisi kondensaatoreid, arvutite elektrilisi «mälusid» jne.

Baariumtitanaadil on veel üks märkimisväärne iseärasus — ta on ka piesoelektrik. See nimetus tuleneb kreeka-keelsest sõnast *piezō* — rõhun. Kui rõhuda baariumtitanaadi plaadikest, siis tekivad selle plaadikese servadel elektrilaengud, kui teda venitada — vahetavad laengud kohti. Ja vastupidi, kui plaadike laadida, siis ta kas laieneb või aheneb. Niisugune omadus on ka mõnel teisel ainel, kuid baariumtitanaat on nendest parim.

Kui baariumtitanaadi plaadikesele anda tavalise tööstusliku sagedusega voolu, siis 50 korda sekundis plaadike aheneb ja 50 korda sekundis laieneb — me kuuleme heli. Kui aga voolu sagedus on tunduvalt suurem, üle 20 000 võnke sekundis, siis hakkab baariumtitanaat väljastama ultraheli. Niisuguste kuuldamatute helide rakendamine on meie päevil iseseisvaks laialdaseks tehnikaharuks muutunud. Ultraheli kasutatakse metallide töötlemiseks, kvaliteedi kontrollimiseks, merepõhja uurimiseks, mõnede haiguste diagnoosimiseks jne.

Kuid piesoelektrikut ei kasutata mitte ainult ultraheli tekitamiseks. Rakettides ja sputnikutes täidab ta hoopis teist ülesannet. — registreerib meteorokehi. Sputniku kesta alla on teatud kohtadesse kinnitatud piesoelektrilised andurid. Meteoori löök kutsub anduris esile vooluimpulsi. Vastava raadioaparatuuri poolt võimendatuna antakse see edasi Maale. Nende impulsside sageduse põhjal otsustatakse meteooriaine tiheduse üle.

LÖPPSÕNA

Me tutvusime mõningate suundadega pooljuhtide tehnikas. Aga kui palju neid veel on! Uued suurepärased materjalid ja nendest valmistatud seadised osutuvad vajalikeks peaaegu kõikides tootmisharudes. Ja iga päev toob sõnumeid sellest, et pooljuhid omandavad üha uusi elukutseid. Esitame mõned niisugustest ajalehtedes ilmunud teadetest.

«Jõge mööda sõidab täpselt kurssi hoides mootorlaev...



ilma tüürimeheta. Viimase kohustusi täidab spetsiaalne seadis — tundlik pooljuhtelement. See «teab» kõik, «näeb» kõik ja saadab õigeaegselt käsklusi masinaruumi.

Automaattüürimees on edukalt proovi läbi teinud. Tema rakendamine võimaldab suurendada liikumiskiirust ja kergendab tunduvalt laevajuhtimist, eriti madala veega jõgedes ja halva ilma korral.»

«NSV Liidu Ministrite Nõukogu juures asuv Leiutiste ja Avastuste Komitee andis välja autoritunnistuse Kasahhi Teaduste Akadeemia teaduslikule töötajale A. P. Ššetililile. Temale kuulub originaalne leiutus — pooljuhtseade, mis võib olla veiste ja lammaste «karjuseks».»

Veel üks teade, mis puudutab majade automaatraketust.

«Roboti osa täidab kraana, mis pealtnäha erineb vähe harilikust tornkraanast. Kraanajuhi kohale on selles asunud kompaktne elektronseade, mis «peab meeles» hoone raketamise järjekorra esimesest kuni viimase detailini. Kui masinisti töö edukus sõltub tema oskusest, siis automaadi puhul on vead välditud.

Kraanat juhitakse raadio teel. Raketaja rinnal on miniatuurne, kahe paberrossikarbi suurune raadiosaatja. Vajutus käivitusnupule — ja kraana suundub «kõhklemata» järjekordse detaili järele. On asjatu püüda tarka mehhanismi segadusse ajada — ta keeldub täitmast väära käsklust.»

Sääraseid teateid võiks koguda kümneid ja sadu — pooljuhtide elukutseid ei jõua juba praegugi enam loendada. Ja näib, et ei olegi piire — teadlased avastavad üha uusi ja uusi pooljuhtide võimeid.

Meil oli juttu pooljuhtidest, mis muudavad valgust ja soojust vahetult elektriks. Võib lisada, et sugugi mitte ainult nähtavat valgust — leidub pooljuhte, mis on tundlikud ka infrapunase, ultravioletse, radioaktiivse ja röntgenikiirguse suhtes... Alles üsna hiljuti valmistati diodid, mis on võimeline täitma vastupidist ülesannet: muutama elektrilised signaalid infrapunaste kiirte kimpudeks. Nii-sugused kimbud võivad tagada side otsese nähtavuse piirides, pealegi mitme kanali kaudu. Infrapunaste kiirte kimp, laiusega üks miljondik sentimeetrit, «mahutab» endasse üheaegselt 20 000 telefonikõnet! Mõõtmetelt ei ole

diod suurem nõöpnõelapeast, kuid tema muundustegur on peaaegu 100%.

See diod on valmistatud galliumarseniidist — galliumi ja arseni ühendist. Samast materjalist tehakse muide tunneldioode ja -transistore. Gallium asetseb Mendelejevi tabeli kolmandas rühmas, arseen — viiendas. Mäletate, just sellised lisandid andsid germaaniumile ja ränile, mis ise asetsevad «keskel» — neljandas rühmas, ühed või teised soovitud omadused. Selgub, et kui kaks niisugust lisandit ühendada, saadakse samuti pooljuht ja pealegi väga huvitavate ning väärtuslike omadustega. Niisama-suguste paaride hulka kuuluvad juba mainitud indium ja antimon, gallium ja antimon, alumiinium ja antimon, indium ja fosfor... Palju teisi ühendeid köidab teadlaste tähelepanu ja töötab uusi võimalusi. Kuulub ju pooljuhtide hulka enamik materjale — igasugused mineraalid, maa-gid, keemilised ühendid, üksikud elemendid.

Muide, elementidest. Samas Mendelejevi tabeli rühmas, kus asetsevad germaanium ja räni, paikneb ka süsinik. Puhas kristalne süsinik — see on teemant, tugevustšempion. Teemant on samuti pooljuht, kuid tema kasutamist piiras väga väike juhtivus — liiga lai keelatud tsoon, ja peale selle ei õnnestunud looduslikku teemanti viia vajalikul hulgal lisandeid, et ta omadusi valitseda. Nüüd aga, mil on võimalikuks saanud teemantide kunstlik süntees, on välismaa ajakirjanduse teadete järgi loodud esimesed teemanttransistorid, mis erinevalt germaanium- ja räni-transistoridest töötavad ka siis, kui temperatuur tõuseb mõnesaja kraadini.

Pooljuhtide hulka kuuluvad samuti orgaanilised ained, näiteks klorofüll. Pooljuhtide füüsika aitab bioloogidel avastada fotosünteesi tähtsaid seaduspärasusi rohelistes taimedes. Luuakse ka kunstlikke orgaanilisi pooljuhte — polümeere. Suurt tööd selles suunas teevad nõukogude teadlased. On juba selge, et niisugused materjalid on kättesaadavad, et neist võib valmistada kilesid, kiude, kangaid. On täiesti võimalik, et see avab tee hoopis uut tüüpi aparaatidele ja seadmetele.

Nii laieneb pidevalt pooljuhtide tehnika arsenal. Nõukogude Liidu Kommunistliku Partei programmis märgitakse, et «üha tähtsamale kohale tootmistehnoloogias asuvad raadioelektronika, pooljuhid, ultraheli». Need tea-

duse uusimad saavutused annavad oma tähtsa panuse kommunismi materiaal-tehnilise baasi loomisse.

Uued võimalused meie majanduse arendamiseks on loonud NLKP Keskkomitee novembripleenumi otsused (1962). Pleenum kavandas tehnilise progressi kiirendamise ja rahvamajanduse juhtimismeetodite täiustamise viisid teel kommunismile.

Pleenumi otsuses märgitakse «vajadust arendada forsseeritult kõige perspektiivsemaid tööstusharusid, nagu näiteks keemia ja elektroonika».

Elektrontechnika on raadioelektronika ja tööstuselektronika, automaatika, elektronarvutus- ja mõõtmistechnika aluseks. Elektroonika on tehnilise progressi magistraaltee Tema üheks peamiseks vahendiks meie päevil on muutunud pooljuhid. NSV Liidu Teaduste Akadeemia president akadeemik M. V. Keldõš rõhutas oma kõnes pleenumil eriti pooljuhtide kui tehnilise progressi tööriista tähtsust ja loetles teaduse põhilisi ülesandeid sel alal.

Pole midagi õelda, ülesanded on keerukad. Tuleb õppida veelgi paremini, veelgi ökonoomsemalt saama ülipuhtaid materjale, veelgi täpsemalt kujundama kristallide struktuuri ja lisandite jaotust nendes, veelgi sügavamalt uurima äärmiselt keerukaid elektroonseid protsesse, mis kulgevad pooljuhtide sees ja pinnal, jne.

Üha uued ja uued seda laadi ülesanded kerkivad esile seoses pooljuhtide tegevusvälja pideva laienemisega. Kuid iga järjekordse ülesande lahendamine avab nende suurepäraste materjalide ees omakorda hulgaliselt erakordseid, sageli ootamatuid kasutusalasid.

Kui püüad haarata ühekorruga pooljuhtide ja nende «elukutsete» kogu mitmekesisust, kui süvened sellesse tõsisasja, et kõik see on tulnud kaasaegsesse tehnikasse üllatavalt lühikese ajaga, siis meenuvad V. I. Lenini sõnad: «Inimmõistus on avastanud palju imepärast looduses ja avastab veelgi rohkem, suurendades sellega oma võimu looduse üle...»

MILLET JUTUSTATAKSE SELLES RAAMATUS

Sissejuhatus	3
Elektron, urve ja kaht liiki pooljuhid	4
Esimesest detektorist transistorini	13
Ja tähed juttu puhuvad	23
Enneolematud elektri jaamad	33
Uued lahendused, uued ülesanded	42
Lõppsõna	51

Ирина Ивановна Пятнова
СТО ПРОФЕССИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
На эстонском языке
Обложка Г. Пант
Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

*

Toimetaja H. Heinoja
Tehniline toimetaja L. Krikmann
Kunstiline toimetaja H. Tikand
Korrektorid E. Bitter ja Ü. Rattur
Ladumisele antud 16. XII 1963. Trükkimisele antud
22. II 1964. Paber 54×84, 1/16. Trükipoognaid 3,5.
Tingtrükipoognaid 2,87. Arvestuspoognaid 3,14.
Trükiarv 6000. Tellimise nr. 9705. H. Heidemanni
nim. trükikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. III

Hind 11 kop.

11 kop.

A-25807

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00356845 0