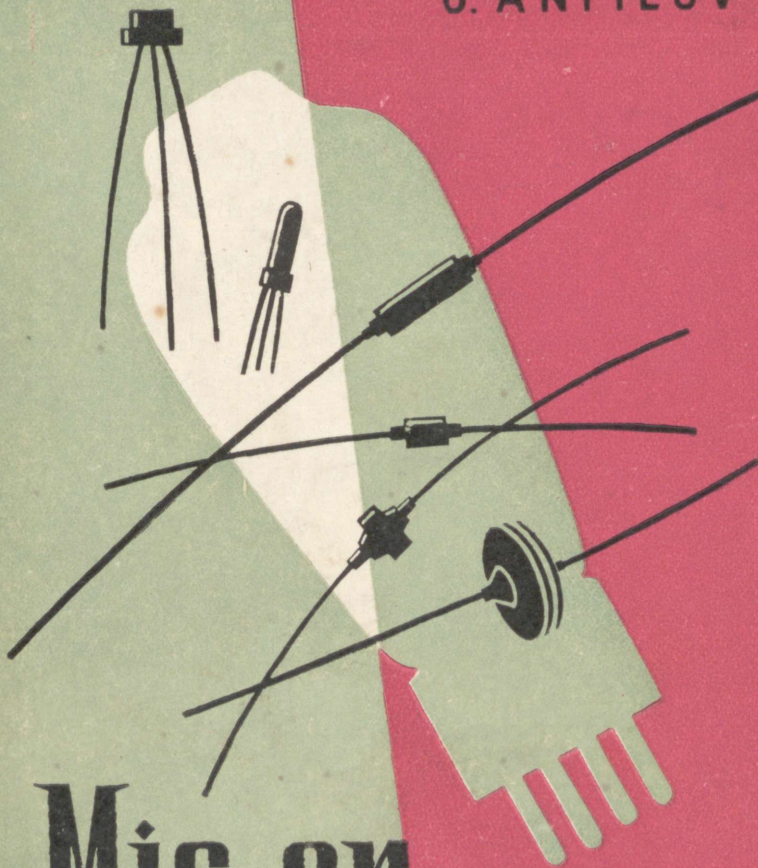


TAHAN KÕIKE TEADA

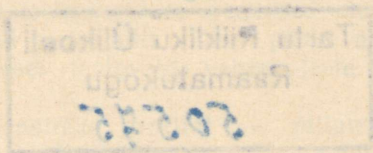
G. ANFILOV



Mis on
pooljuhia

G L E B A N F I L O V

M I S
O N
P O O L J U H I D



E E S T I R I I K L I K K I R J A S T U S
T A L L I N N • 1 9 6 0

Originaali tiitel:

Г. Анфилов

ЧТО ТАКОЕ ПОЛУПРОВОДНИК

Детгиз, Москва 1957

Kunstiliselt kujundanud V. Vare

Tõlkinud I. Rae

*

Raamatus antakse populaarses vormis ülevaade pooljuhtide omadustest ja nende elektri-juhtivuse mehhanismist. Pikemalt on peatunud küsimustel, mis on seotud pooljuhtide rakedustega kaasaegses tehnikas.

2

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

50575

SISSEJUHATUSE ASEMEEL

Te istute laua äärde, süütate tule ning avate raamatu.

Kuid loobuge hetkeks lugemisest ja vaadake enda ümber.

Elektrilambis särab peenike volframspiraal, milleni lähevad vaskjuhtmed — energia edasiandjad. Vask ja volfram lasevad elektrivoolu suurepäraselt läbi. Niisugune omadus on ka teistel metallidel ning seepärast neid nimetataksegi juhtideks.

Kuid lambi klaaskolb, seintel asuvad portselanrullid ja juhett ümbritsev kummikest voolu peaaegu üldse läbi ei lase. Neid nimetatakse isolaatoriteks.

Juhid ja isolaatorid on peamised elektrotehnikas kasutatavad materjalid. Kuid peale nende esineb looduses veel teatavaid vahepealsete omadustega aineid.

Võtame näiteks grafiidi — pliiatsi südamikku. Elektrit ta küll juhib, kuid tunduvalt hälvemini metallidest. Paljud kristallid, sulamid, igasugused soolad ja hapendid sarnanevad selles suhtes grafiidiga. Niisugused ained saidki nimetuse pooljuhid.

Meid ümbritsev maailm on pooljuhtidest väga rikas. Neid võib saada lihtsast liivast, tahmast ja kividest.

Võib öelda, et iga päev sööme me hommiku-, lõuna- ja õhtusöögiks pooljuhte, et me tallame neil,

sest maakooses kõige enam levinud element — räni — ja elu alus — süsinik — moodustavad pooljuhtide kristalle.

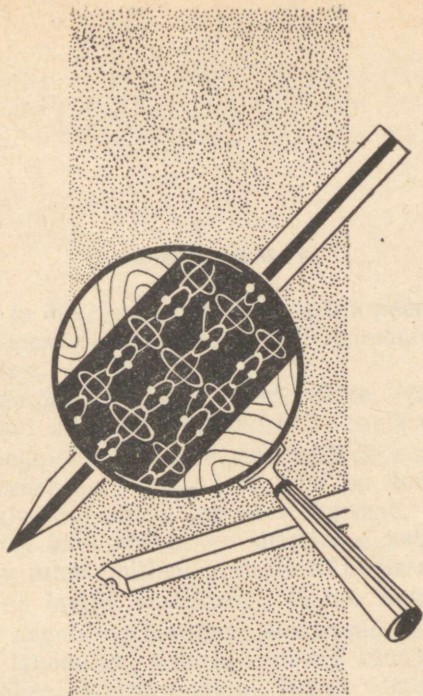
Juba iidsetest aegadest peale püüdis inimene omandada kõike, mida loodus talle kinkis. Pooljuhte sisaldavaid toormaterjale hakkas ta kasutama metallurgias, keemias, ehitustöös — kõikjal peale elektrotehnika.

Siin loeti pooljuhte ebasobivateks. Mõeldi, et nendega ei saa asendada ei vaskjuhet ega portselanulle. Näis, et pooljuhtide vahepealsetest omadustest pole mingisugust kasu, ja paljude aastakümnete jooksul ei huvitunud keegi sügavamalt nende elektrilistest omadustest.

Kuid aeg näitas, et niisugune hoolimatus oli suur viga. Meie ajal mõistavad uurijad nende ainete suurt praktilist tähtsust ja praegu tegelevad paljud teadlased pooljuhtide teooria ja tehnikaga.

Milles siis seisab pooljuhtide väärtus?

Ärgem rutakem vastamisega! Kõigepealt püüame aru saada lihtsamatest asjadest.



ELEKTRIJUHTIVUSE SALADUSED

A A T O M I D

Maa ja õhk, kaljud ja meri, lill ja peenim sooneke meie kehas — kõik koosnevad lugematust hulgast aatomitest.

Iga aatom on kujutlematult väike. Nööpnõelapea ja aatomi mõõtmete vahekord on samasugune nagu nööpnõelapea ja Elbruse mäe mõõtmete suhe. Aatom ise koosneb aga osakestest, mis on temast endast veel sajad tuhanded korrad väiksemad.

Aatomi keskpunktis on massiivne aatomienergiat sisaldav tuum, milleni inimene küündis alles hiljuti. Tuum on laetud positiivselt, ümber tuuma liiguvad kerged negatiivse laenguga elektronid. Need püsivad tuuma läheduses, alludes üldisele füüsikaseadusele: erinimelise elektriga laetud kehad tõmbuvad teineteise poole.

Kas on olemas palju erinevaid aatomeid?

Mitte väga palju. Koos nendega, mis viimastel aastatel on saadud kunstlikul teel, tunneb teadus sada liiki aatomeid. Ja ongi kõik, kui mitte arvestada iga liigi erinevaid sorte. Sellest osakeste hulgast on ehitatud meid ümbritsev lõpmatult mitmekesine maailm.

Aatomid erinevad üksteisest tuumalaengute suuruse poolest. Vesiniku aatomi tuumal (see on kõige lihtsam tuum) on kõige väiksem laeng. Vesiniku aatomi tuum sisaldab ka ainult ühe elektroni. Vase aatomi tuumal on kakskümmend üheksa korda suu-

rem laeng, järelikult on igas vase aatomis ka kakskümmend üheksa elektroni.

Elektronid on aatomis paigutatud ranges korras. Nad liiguvad kinniseid teid, nn. orbiite mööda. Orbiidid moodustavad tuuma ümbritsevaid elektronide kihte.

Mida ligemal tuumale on elektronikiht, seda tugevamini on elektronid seotud tuumaga. Selleks et välja lüüa elektroni mingist sisemisest kihist, läheb vaja tugevat tõuget, seega ka suurt energiat. Kergem on eemaldada elektrone, mis paiknevad välimistes, kaugemates kihtides.

Kõige välimise kihi elektronidel on väga tähtis osa: nad seovad aatomeid kristalliliseks struktuuriks, ühendavad neid molekulideks. Just need elektronid, mis asuvad aatomite välistes kihtides, määravad keemilised protsessid, kehade elektrilise oleku ja paljud teised omadused.

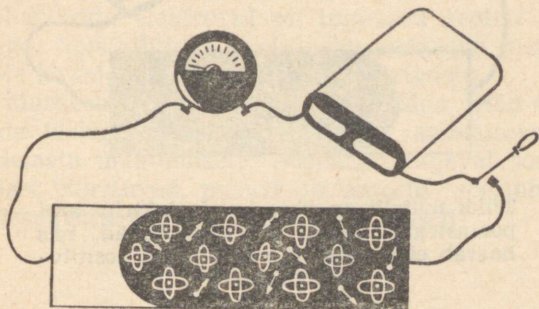
Kuidas käituvad välised elektronid erinevates ainetes?

ELEKTRONID METALLIS JA ISOLAATORIS

Välised elektronid vase aatomites ei jää tuuma ligidusse, sest oma aatomi tuumaga on nad seotud liiga nõrgalt. Aatomid on kogu aeg korrapäratus liikumises ja nagu raputaksid enese küljest väliseid elektrone. Eemaldunud elektronid rändavad mööda metalli, võttes osa korrapäratust soojuslikust liikumisest, mis on seda aktiivsem, mida kõrgem on traadi temperatuur.

Elektronide maailmas ei märka me maakera külgetõmbejõudu. Seda on väga lihtne seletada: need osakesed on liiga kerged ja liiguvad liiga kiiresti. Seevastu alluvad elektronid teisele — elektrilisele

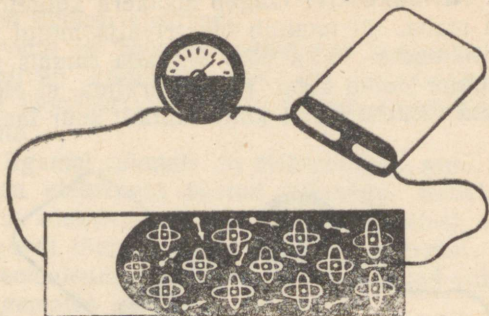
jõule. Nii nagu kivi langeb maakera külgetõmbejõu mõjul maha, nii muutub elektrivälja mõjul elektronide liikumine. Välja võib tekitada ruumis ükskõik missugune laetud keha. Peab märkima, et elektronil on tema väikese massi kohta küllalt suur laeng.



Metallis pole paljud elektronid seotud kindlate aatomitega, vaid liiguvad korrapäraselt nende vahel.

Ühendame juhtme otsad elektripatarei poolustega — kohe läbib metalli elektriväli. Nüüd võtavad vabad elektronid osa mitte üksnes korrapärasust soojuslikust liikumisest, vaid liiguvad elektrivälja mõjul mööda juhet patarei positiivsele poolusele. Lahkunud elektronide vabaks jäänud kohtadele tõukab elektriväli teisi elektrone patarei negatiivselt pooluselt. Ka need lähevad ära, andes koha üha uutele ja uutele elektronide hulkadele — mööda juhet «jookseb» elektrivool.

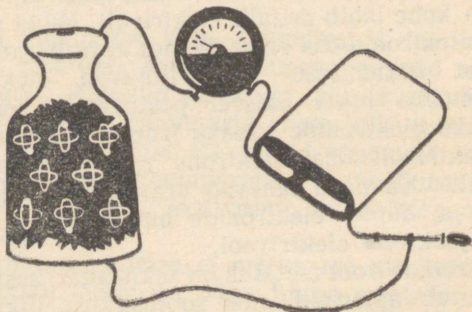
Elektronide vool metallis on takistatud, sest nende teele satub aatomeid, mis soojuslikust liikumisest osa võttes kogu aeg liiguvad. Seepärast on juhtme soojendamisel elektronide voolul järjest raskem



Tükk metalli on ühendatud elektripatarei poolustega. Metalli läbib elektriväli, mis haarab elektronid ja suunab nad positiivsele poolusele.

edasi tungida. Temperatuuri tõusuga voolutugevus väheneb. See on metallide elektrijuhtivuse oluline tunnus.

Märgime muuseas, et elektrivool ise soojendab traati. Mida tugevam on elektronide vool, seda tuge-



Välised elektronid isolaatoris hoiduvad kindlalt oma aatomi juurde, seepärast pole elektrivoolul midagi edasi kanda.

vamaid lööke annab ta aatomitele, suurendades seega nende soojusliku liikumise energiat.

Isolaatoris on kõik palju lihtsam. Muidugi, kumm, portselan ja klaas koosnevad samuti aatomitest ja nagu metallis, nii ka siin on aatomid korräpäratus soojuslikus liikumises. Kuid isolaatorite aatomite väliskihtide elektronid on tugevasti seotud tuumadega. Neis kihtides ei ole vabu elektrone, tähendab, pole ka midagi, mis tekitaks elektrivoolu.

Muuseas, kui isolaatorit soojendada, võib ta kaotada isoleerivad omadused tänu aatomitevaheliste sidemete muutumisele. Seepärast tugeval soojendamisel muutuvad mõned isolaatorid pooljuhtideks. Missugused on pooljuhtide iseärasused?

ESIMENE TUTVUS

Viskame vasktraadi ahju, mille temperatuur on tuhat kraadi. Traat on üsna sulamise piiril, tema pinnal tekib aga aktiivne keemiline reaktsioon — metall ühineb õhuhapnikuga. Iga vase aatomite paar seob ühte hapniku aatomit. Mõne minuti möödumisel kattub traat musta vasealahapendi kihiga. Eemaldame selle kihi ja anname keemialaboratoriumisse palvega hoolikalt puhastada hapend lisanditest. Ja kui keemikud täpselt täidavad meie palve, saame neilt tüki ideaalselt puhast pooljuhti.

Teeme sellega mõned katsed.

Kõigepealt kontrollime, kuidas ta juhib elektrivoolu.

Selgub, et tunduvalt halvemini kui vask. Tulemus ei ole melle ootamatu: just sellepärast teda nimetataksegi pooljuhiks.

Seevastu tundub melle kummalisena teise katse tulemus: mida tugevamini me hapendi kristalli soo-

jendame, seda paremini juhib ta elektrivoolu. Nagu me aga mäletame, oli vasktraadi korral nähtus vastupidine.

Milles on siin asi?

Pooljuhis ei ole välised elektronid kuigi tugevasti seotud aatomi tuumaga ja kuuluvad harilikult korraga mitme naaberaatomi koosseisu, sidudes neid omavahel. Temperatuuri tõusuga suureneb korrapäratu soojusliku liikumise energia. Soojendamine rikub aatomitevahelist sidet, vabaneb üha rohkem elektrone ja ühtlasi tõuseb ka võime juhtida elektrit.

Nüüd oleks nagu kõik arusaadav. Kui me aga nendest kaalutlustest koostaksime matemaatilised võrrandid ja arvutaksime teoreetiliselt kristallihapendi elektrijuhtivuse, siis pettuksime. Arvutustega määratud elektrijuhtivuse väärtus oleks peaaegu kaks korda väiksem tegelikest, katse teel saadud tulemustest.

Tähendab, mingisugust nähtuse külge me ei ole arvestanud.

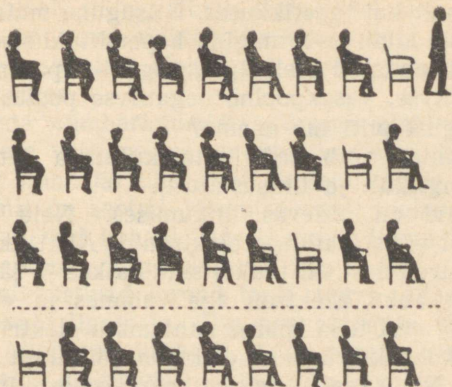
Aga missugust?

Et leida vastust sellele küsimusele, läheme noorsooteatrisse ekskursioonile.

TÜHI TOOL

Täna mängitakse suurepärasest näidendist ja teatri-saal on pealtvaatajatest tulvil. Kuid meie ei hakka jälgima sündmuse laval, vaid pöörame tähelepanu tähtsusetule sündmusele saalis.

Me istume vahekäigu ääres ja vaatame vastasküljele. Esimesest kuni viimase reani ei ole ühtki vaba kohta. Lapsed vaatavad huviga etendust. Millegipärast väljus esimeses reas äärmisel toolil istuv õpilane. Niipea kui koht vabanes, istus sinna viivitama-



Pealtvaatajad istuvad teatrisaalis üks-
teise järele ümber, lähemale lavale.

tult koheva juuksetutiga pioneer teise rea äärmiselt istmelt. See on arusaadav: teises reas istuda pole halb, kuid esimeses on kahtlemata parem. Aga edasi? Patsidega tüdruk, kes istus kolmandas reas äärmisel toolil, jooksis kiiresti pioneeri kohale teises reas. Tütarlapse vabanenud toolile istus tema sõbratar neljandast reast, aga tema kohale poiss viiendast reast. Ühe sõnaga, kõik äärmistel toolidel istujad liikusid ühe koha võrra edasi. Samal ajal «liikus» tühi koht läbi saali tahapoole — esimesest kuni viimase reani. Ongi kõik, mida me pidime teatris nägema. Nüüd võime pöörduda tagasi aatomite ja elektronide maailma.

NAGU TEATRIS

Kujutleme, et muutume miljonid korrad väiksemaks ja suudame jälgida nähtamatuid protsesse, kusjuures need protsessid toimuvad tuhandeid kordi

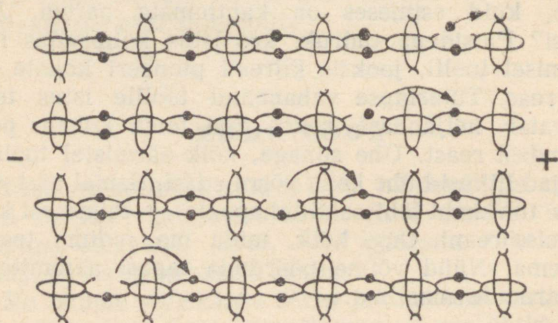
aeglasemalt kui tegelikkuses. Niisugune muinasjutuline võime aitab meil tungida hapenditüki sisemusse, mis on ühendatud elektripatareiga — parempoolne ots positiivse, vasakpoolne negatiivse poolusega.

Missugust pilti me näeme?

Üldjoontes võib seda ette kujutada järgmiselt (väga tinglikult ja lihtsustatult).

Aatomid on pidevas liikumises. Neid seovad omavahel välise kihtide elektronid. Äkki üks välistest elektronidest sai tõuke, side katkes ja järele jäi nii-öelda auk. Elektron aga vabanes ja «lendas» paremale, sest teda haaras nähtamatu elektriväli.

Kuid koht, kus äsja oli elektron, jäi ainult hetkeks tühjaks. Nagu teatris teisest reast koheva juuksetuuga pioneer istus kiiresti esimeses reas vabanenud kohale, nii asus lahkunud elektroni kohale teine elektron naaberaatomi välisest kihist. Niisuguse «ümberistunud» elektroni energia pole kuigi suur. Mingisuguseid ülemäära tugevaid tõukeid ta ei saa-



Pooljuhi aatomite välised elektronid «vahetavad peremehi» — hüppavad «vabanenud kohale» selles suunas, kuhu neid tõmbab elektriväli. Aga purustatud aatomitevaheline side liigub sel ajal vastupidises suunas nagu vabanenud koht teatrisaalis.

nud. Ta lihtsalt libises ühelt kohalt teisele, nagu oleks teda puhunud elektrivälja kerge tuul. On ju pooljuhtide aatomites elektronid seotud nõrgemini kui isolaatorites.

Peale seda «ümberistumist» purunes elektroonne side* esimese vasakpoolse aatomi ja tema naabri vahel ning sinna jäi tühi koht. Sellele kohale tuleb elektron, mis on seotud järgmise vasakpoolse aatomiga. Vabanenud kohale libiseb vasakult omakorda kolmanda aatomi väline elektron jne.

Teatrisaalis istusid lapsed tooli võrra edasi, et pääseda lavale ligemale. Siin aga aatomite välised elektronid hüppavad üksteise järele paremale (sinna tõmbab neid elektriväli), kusjuures igaüks teeb ainult ühe sammu.

Tegelikult on see nähtus palju keerulisem: tunduvalt häirib teda osakeste korrapäratu soojuslik liikumine. Kuid põhijoontes sarnaneb see kirjeldatuga.

KAKS VOOLU

Niisliis tekitavad elektrivoolu pooljuhtis mitte üksnes need elektronid, mis mingisugusel põhjusel on vabanenud aatomite «vangistusest».

Need elektronid, mis pole täiesti vabad, vaid hüppavad aatomilt aatomile, nihkuvad sinnapoole, kuhu neid tõmbab elektriväli. Aga niisugune laengute liikumine pole midagi muud kui samuti elektrivool.

Me jõuame järeldusele, et pooljuhtides on kaht liiki elektrivoolu. Esimese põhjustavad aatomitest väljalöödud vabad elektronid ja seda nimetataksegi elektroonseks vooluks. Teine sõltub aatomitega seotud elektronide liikumisest ja seda nime-

* Elektroonne side — side elektronide vahel aatomis.

tatakse aukvooluks. Kust tekkis niisugune nimetus?

Proovime, kuidas saaksime jutustada sellest, mida me nägime noorsooteatris?

Tuleb meelde selline kirjeldus: esimeses reas vabanenud kohale istus vaataja teisest reast; kohale, mis vabanes teises reas, istus vaataja kolmandast reast... kohale, mis vabanes kolmekümne üheksandast reast, istus vaataja neljakümnendast reast. Kui palju sõnu! Kui palju aega võtaks nende lugemine! Aga proovige nendeta hakkama saada, kui te veel ei tea nähtuse olemust. Raske! Mitte juhuslikult ei seletanud me esimesel korral seda näidet just nii. Teisiti oleks tekkinud arusaamatusi.

Nüüd, kus me teame, mis toimus teatrisaalis, võime sellest rääkida palju lühemalt: vabanenud koht nihkus esimesest reast neljakümnendasse ritta.

Pooljuhi kristallis me märkasime analoogset nähtust. Ja selle asemel, et lugeda ühekaupa kõiki elektronide ümberpaiknemisi vasakult paremale, võime me lühidalt öelda: purustatud aatomitevaheline side rändas läbi kogu kristalli paremalt vasakule. Füüsikute ettepanekul nimetatakse seda purunenud sidet lihtsalt auguks. Nüüd saab seda nähtust kirjeldada üsna lühidalt: auk liigub läbi kristalli paremalt vasakule.

KUJUTELDAV OSAKE

Auk rändab elektripatarei negatiivse pooluse suunas, tähendab, ta käitub nagu mingi osake, millel on positiivne elektrilaeng. Arendades edasi seda täiesti tinglikku analoogiat, selgub, et augu laengu suurust võib lugeda võrdseks elektroni laenguga.

Arvutuste ja kirjelduste lihtsustamiseks leppisid füüsikud kokku, et peale negatiivselt laetud osa-

keste, s. o. vabade elektronide, on voolu edasikandjateks pooljuhtides veel positiivselt laetud augud. Siit pärinevad ka nende kahe voolu nimetused — elektron- ja aukvool.

Peab alati meeles pidama, et tegelikud voolukandjad on ikkagi elektronid, kuna auk ei ole üldse tõeline osake. Augul pole ei massi ega laengut.

Elektronide vabanemisega pooljuhi kristallis käib kaasas sama arvu aukude tekkimine. Elektrivälja mõjul liiguvad elektronid ja augud vastupidistes suundades. See tähendab, et kristallis tekivad üheaegselt elektron- ja aukvool. Need voolud koos määravad pooljuhi elektrijuhtivuse. Lisame, et vabad elektronid on mõnevõrra liikuvamad kui augud. See pärast on elektronide vool ülekaalus — ta on natuke tugevam aukude voolust.

Kas te arvate, et me juba täielikult paljastasime kristalli juhtivuse sisemised põhjused? Ei. Mitte asjatult ei andnud me vasehapendit puhastamiseks keemialaboratooriumi.

See, millest te seni lugesite, kehtib ainult ideaalselt puhta pooljuhi kohta. Reaalsetes pooljuhtides, kus kindlasti on kas või väga vähesel määral lisandeid, on asi palju keerulisem.

AATOMID — KÜLALISED

Pöördume tagasi hapendikihi juurde, mis tekkis kuuma ahju asetatud vasktraadile. Missuguseid lisandeid sisaldas ta enne puhastamisele viimist?

Pinnalt oli ta tõenäoliselt «mustatud» liigsete hapniku aatomitega, mis sattusid sinna õhust. Vastu metalli olevalt kihilt olid hapendisse tunginud liigsed vase aatomid.

Võrdleme, mis laseb paremini elektrivoolu läbi:



Vasest imuvad hapendi kihti «liigsed» vase aatomid, aga õhust — «liigsed» hapniku aatomid.

hapend, mis sisaldab väikeses koguses hapniku aatomeid või ideaalselt puhas hapend?

Katse näitab, et üleliigsed vase aatomid suurendavad järsult pooljuhi elektrijuhtivust.

Millega seda seletada?

Vase aatomitelt juurdetulnud välised elektronid saavad vabaduse palju kergemini kui hapendi aatomite välised elektronid. Seejuures ei kaasne elektronide vabanemisele vase aatomitest aukude ilmumine. Hapendi aatomite elektronid ei satu vabadele kohtadele vase aatomites, sest neil ei jätku selleks energiat. Seega on üleliigsed vase aatomid ainult vabade elektronide allikaks. Need elektronid mängivad pooljuhis peavoolu kandja osa. Selliseid lisandeid nimetatakse doonoriteks*, neid sisaldavaid pooljuhte elektroonseteks.

Niisiis suurendas vase üliküllus hapendi juhtivust. Selline katse tulemus ei olnud meile sugugi ootamatu: pooljuhi materjalile lisati natuke metalli ja oli põhjust oodata, et aine elektrijuhtivus selle tagajärjel paraneb. Kui aga nii, siis lisades hapnikku, millel pole mingisuguseid metallilisi omadusi, peaks hapendi elektrijuhtivus vähenema.

Mitte midagi niisugust!

* Ladinakeelsest sõnast «kinkija».

Tehes vastava katse, ilmneks, et vähene hapniku aatomite lisandamine mitte ei vähenda, vaid vastupidi, tunduvalt suurendab hapendi juhtivust, pea-aegu niisama palju kui vase aatomite lisamine. Jällegi mõistatus!

Kuid see mõistatus laheneb päris lihtsalt.

ELEKTRONIDE PÜÜDJAD

Peame meeles, et voolu edasikandjateks pooljuhis pole mitte ainult vabad elektronid, vaid niisugust osa võivad täita ka augud — kohad, kust elektronid on ära läinud. Selgub, et hapniku aatomite üleküllus vase hapendis tekitab auke. Kuidas see toimub?

«Liigne» hapniku aatom mitte üksnes hoiab oma elektrone tugevasti kiinni, vaid tõmbab neid oma välisele orbiidile ka mujalt. Hapendi aatomiga seotud elektronil on tunduvalt kergem üle minna juurdetuleva hapniku aatomisse kui end täiesti aatomeist lahti rebida. Hapniku lisandi poolt kinnipüütud elektronid jätavad augud hapendi aatomite vahelistesse elektroonsetesse sidemetesse. Pooljuhis tekib elektronidest hõivamata jäänud kohtade küllus — seega aukude küllus. Augud on siin ka põhilisteks voolukandjateks.

Pooljuhte, mis sisaldavad niisuguseid lisandeid, nimetavad füüsikud aukjtiivusega pooljuhtideks. Lisandid ise kannavad nimetust aktseptorid*.

Nagu me nägime, võib vasehapend olla elektronvõi aukjuhtivusega pooljuht, vastavalt sellele, mis suguseid lisandeid ta sisaldab. See käib ka kõigi teiste pooljuhtmaterjalide kohta. Tuleb välja, et

* Ladinakeelsest sõnast «vastu võtma».

aatomid-külaliséd mõjutavad väga tugevasti pere-meestest aatomite iseloomu ja käitumist. Sageli muudab minimaalseim lisandihulk järsult pooljuhi elektrilisi omadusi. Elektrijuhtivus võib suurenda kümneid, sadu, tuhandeid ja isegi sadu tuhandeid kordil! Eriti kasvab elektrijuhtivuse sõltuvus temperatuurist ja teistest välistest teguritest.

Kuid peamine on see, et viies puhastatud pooljuhti teatud hulgal mingeid lisandeid, võib inimene teadlikult muuta niisuguste materjalide elektrilisi omadusi. «Liigsed» aatomid ei osutu enam sugugi liigseteks. Lõppkokkuvõttes viis just see võimalus mitmesuguste pooljuhtidega töötavate aparaatide ja seadmete loomisele.

ORIGINAALSEST TEOORIAST

Enne kui jutustada edasi, peab autor paluma vabandust.

Et seigitused oleksid lihtsamad ja ülevaatlikumad, tuli mõnevõrra lihtsustada füüsikaliste protsesside olemuse kirjeldusi. Teadlased arvestavad siin veel paljusid asjaolusid, millest meie pidime vaikima.

On olemas üks esimesel pilgul imelikuna tunduv fakt. Elektronil on vasturääkivad omadused. Ta käitub mitte ainult kui osake, vaid ka kui laine. Algu- ses on raske seda tunnetada. Füüsikud on sellega lihtsalt harjunud — pole midagi parata, niisugune on juba kord väikeste osakeste maailma iseärasus. Need kahe- sugused omadused on aga täiesti ümber- lükkamatult tõestatud.

Kui arvestada elektronide lainelisi omadusi ja teisi väikeste osakeste iseärasusi — nende omavahe- lisi sidemeid ja vastastikust mõju — võib kõike loe-

Sotsialistliku töö kangelane akadeemik Abram Fjodorovitš Joffe.



tut esitada täiesti rangelt, täpsete matemaatiliste arvutustega.

Niisugune töö on väga raske. Füüsikute teele ilmub terve hulk ettenägematuid raskusi. Selleks et neist vabaneda, tuleb luua mitmesuguseid hüpoteese, sooritada väga palju arvutusi ja korraldada keerulisi katseid.

Seepärast on pooljuhtide teooria loomine teaduse suurepärase võit. See on paljude uurijate mitmeaastaste otsingute kokkuvõte. Suur osa sellest tööst kuulub nõukogude füüsikutele eesotsas sotsialistliku töö kangelase akadeemik A. F. Joffega.

Praegu jätkub pooljuhtide teooria arendamine ja viimistlemine.

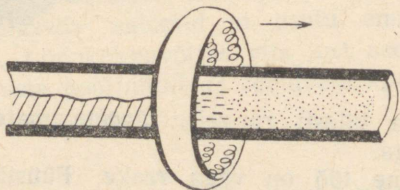
POOLJUHTIDE SAAMINE

Teadus lahendas pooljuhtide elektrijuhtivuse saladused. Muutus arusaadavaks vabade elektronide ja aukude tähtsus, samuti lisandite osa pooljuhtide omadustes.

Mida tuleb teha, et saada soovitud omadustega pooljuhti?

Teooria väidab: kõigepealt tuleb materjal hoolikalt puhastada ja siis valitud ainega natuke «mustata».

Pooljuhti «mustata», s. t. viia temasse lisandit, ei ole raske. Kuid teda eelnevalt puhastada on mõnel juhul vägagi raske. Mõnikord peab pooljuhi puhastama niisuguse astmeni, et iga kümne miljardi aatomi kohta tuleb ainult üks võõras aatom. Kat-



Kvartstorus on pulbriline pooljuhtmaterjal. Rõngasahi liigub aeglaselt vasakult paremale. Pulber ahju all veeldub ja vedelikust eraldatakse lisandid. Nii puhastatakse pooljuhte lisanditest.

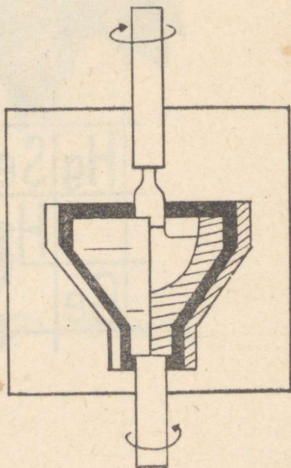
suge leida mõnda punast liivatera suure isekallutaja kastist, mis on täidetud kollase liivaga! Keemikute ülesanne, kes puhastavad pooljuhte, on veel raskem, sest aatomit ei saa haarata käega: ühes liivateras on neid samapalju kui liiva mere ääres. Sellest hoolimata tulevad tänapäeva keemia ja metallurgia selle raske ülesandega väga edukalt toime.

Perenaine soolas talveks tünni kurke ja pani selle kuuri. Tuli tugev külm ja soolvesi külmus pealt kinni. Maitske seda jääd. Tele imestuseks pole ta sugugi soolane.

Vesi külmus soolveest puhtal kujul, aga soola lisand jäi lahusesse.

Külmunud aine on peaaegu alati puhtam vedelikust, millest ta kristalliseerub. See nähtus on teadusele juba ammu tuntud. Just seda teed kasutavadki keemikud pooljuhtide puhastamiseks. Aine pihustatakse pulbriks ja puistatakse pikka sõrmejämmedusse horisontaalselt kinnitatud kvartstorusse. Piki toru liigub ühest toru otsast teiseni väike keraamilisest materjalist valmistatud rõngakujuline elektriahi, mille sisemusse on paigutatud spiraal (nagu elektripliidil). See rõngasahi sulatab pulbri, ahju edasiliikumisel sulanud pulber hangub uuesti. Lisandeid nagu lükatakse edasi ja tagasi (siin on tähtis osa lisandite võimel lahustuda erinevalt tahkes ja vedelas aines).

Toru keskelt saadakse puhast ainet. Muuseas, ka seda puhastamist peab kordama mitu korda.

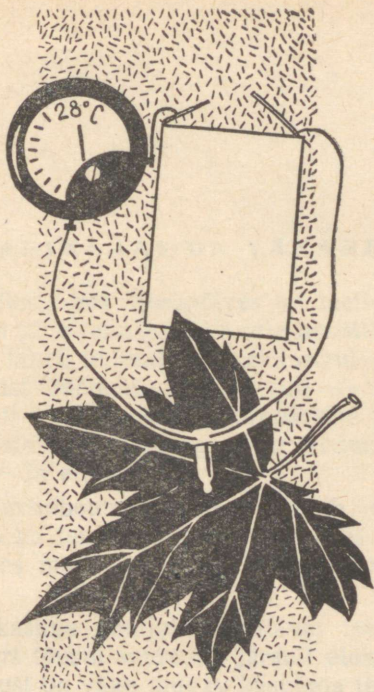


Sulamist pooljuht-monokristallide eemaldamise seadme skeem. Selleks et kristalliseerumine kulgeks ühtlaselt, pöörlevad sulamivann ja kristall pidevalt erinevates suundades.

Hoolikamaks puhastamiseks kasutatakse ka teist meetodit: materjal sulatatakse ja asetatakse temasse väike puhas kristall, mida aeglaselt hakatakse üles tõstma. Kristall kasvab kiiresti. Selleks et kristalliseerumine toimuks õigesti, pöörlevad anum ja kristall vahetpidamata erinevates suundades. Mõnikord teostatakse seda operatsiooni õhuta keskkonnas või spetsiaalses kaitseatmosfääris. Nii eraldatakse vedelast kivist terve sambake puhastatud materjali. Esimese puhastuse järel on temas alati küllaldaselt lisandeid. Tekkinud sambake puhastatakse uuesti ja saadakse uus, veel puhtam sammas jne.

Keemiliselt puhaste pooljuhtide saamine on väga suurt jõu- ja vahenditekuulu nõudev keeruline tööstuslik protsess. Seepärast ongi pooljuhid veel kallid, vaatamata nende valmistamiseks kasutatava loodusliku tooraine küllusele. Õppida kiiremini ja lihtsalt seda varandust välja tooma — see on praegu siht, mille poole püüdlevad teadlased. Ülesanne on antud, tee tema lahendamiseks on selge.





TERMOMEETRI ASEMEL

KRAADIKLAAS ON VANANENUD

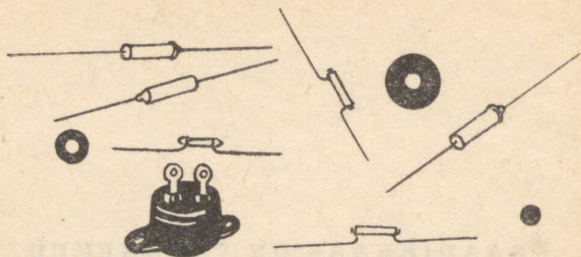
Palju sellest, mis lapsepõlves oli meile tuntud ja tavaline, on tänu tehnika arengule unustusse jäänud. Minevikku läheb küünal, ja vaskkastrul annab koha alumiiniumist õdedele. Kuulus siid — mooruspuu tõugu sünnitis — asendub suurepärase puukiust ja söest valmistatud kangastega. Auruvedureid asendavad mootor- ja elektrivedurid.

Kuigi elavhõbetermomeeter tundub olevat igavene, tuleb ka temal pikkamööda minna erru, muuseumi, jättes maha pärija — väikese pooljuhtaparaadi.

Me märkasime pooljuhi huvitavat iseärasust — temperatuuri tõusul suureneb järsult elektrijuhtivus. Seda omadust on väga mugav kasutada temperatuuri mõõtmiseks.

Klaasplaadikesele on kantud pooljuhikiht, mille mõlemale poolele kinnitatakse metalljuhtmed. Need ühendatakse elektripatareiga läbi galvanomeetri, s. o. aparadi, mis registreerib voolumuutusi. Niisugune riist on lihtsaim pooljuht-termomeeter — termotakisti ehk termistor.

Külmas keskkonnas on vool läbi termistori väike, kuid mida soojem on keskkond, seda tugevam on vool. Aparadi osuti näitab temperatuuri tõusu kohe Celsiuse kraadides.



Nii näevad välja mõned tööstuses toodetud termotakistid.

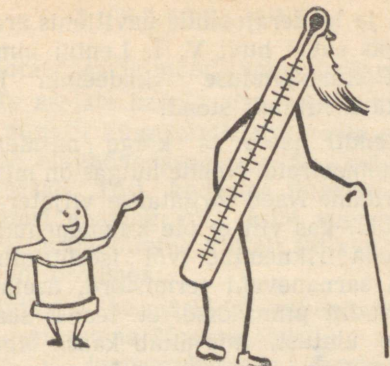
Meil toodetakse väga mitmesuguseid termistore. Need võivad olla näiteks plaadikujulised, lihtsad klaasballoonikesed või klaaspärlid traadist sabakestega, konfetisuurused tabletikesed või vaevaltmääratavad pooljuhitükikesed, mis asetsevad galvanomeetri osutitel.

TUHAT MÕÖTMIST

Mitte usaldades oma tajusid, vaatate sageli toa-termomeetrit. Kui hõbedase vedeliku sammas on peatunud arvul 14, tähendab, on külmavõitu, tuleb rohkem kütta ahju või avada keskküttepatarei kraan.

Kujutlege, et olete suure hoone komandant, kes peab pidevalt jälgima korruga temperatuuri sadades, vahel isegi tuhandetes ruumides. Näiteks võiks see hoone olla mingi täppisaparaatide tehas, kus nii riistade valmistamisel kui ka katsetamisel on vajalik rangelt püsiv temperatuur. Kuidas toimida sel juhul?

Asetame igasse ruumi juba läbiproovitud abilise — elavhõbetermomeetri. Kas on võimalik ühel inimesel neid kõiki jälgida? Selleks tuleks



pidada tervet käskjalgade koosseisu. Loobudes aga elavhõbetermomeetrist ja vahetades ta termotakis-tiga, lahendub see ülesanne väga kergesti. Tuhandes tsehhides, ladudes ja laboratooriumides asetsevad termistorid annavad juhtmete kaudu kiiresti ja täp-selt temperatuuri näidu edasi komandandi toas asu-vale aparaadile. Siit on ainult üks samm keskkütte automaatseks tsentraliseeritud juhtimiseks.

Meie päevil peavad insenerid jälgima temperatuuri ka niisugustes kohtades, kus ei saa kasutada hari-likke termomeetreid. Proovige elavhõbetermomeetri abil teada saada, missugune on mingi keeruka masina sisemuses oleva detaili temperatuur! Sellest ei tule midagi välja, sest habrast mõõteriista sinna asetada ei saa ja pealegi pole võimalik jälgida tema näitu. Aga temperatuuri peab teadma, et vältida hõõrduvate osade ohtlikku ülekuumenemist, laagrite sulamist ja kindlaks teha mehhanismide töö iseära-susi erinevates tingimustes.

Suurt kasu lubavad termistorid tuua ka meie põl-lumajandusele. Üleliidulisel põllumajandusnäitusel

Leningradi ja looderajoonide paviljonis äratas külastajate hulgas suurt huvi V. I. Lenini nimelise Üleliidulise Põllumajanduse Akadeemia Leningradi Agrofüüsika Instituudi stend.

Sellel stendil näete te kõige mitmekesisemaid elektrotermomeetreid. Nende hulgas on mitme meetri pikkusi vardaid. Need torgatakse viljaterade kuhja, et kontrollida, kas vili ei ole kuumenenud ja kas ei ähvarda teda riknemine või isesüttimine. Teisi, mõõkadega sarnanevaid termistore, asetavad agronoomid kevaditi pinnasesse, et teada saada mulla soojenemise ulatust, mis aitab kaasa õige külviaja määramisele. Sama eesmärk on ka aparaadil iseloomustava nimetusega «termo-ämblik». Tema traadist «käpad» lõpevad väikeste termistoridega, mis määravad pinnase soojenemise astme, aparadi osuti näitab aga keskmist temperatuuri.

Kuid kõige huvitavam on siin automaatne kaugus-elektrotermomeeter. Kolhoosi juhatuses või laboratooriumis seisab laual väike aparaat, millest ulatuvad juhtmed viljaaitadesse, juurviljahoidlatesse ja seemneviljasalvedesse. Igale poole on üles seatud termistorid. Kui kusagil ettenähtud vajalik temperatuur muutub, annab tsentraalaparaat kohe häirekella. Kell on signaaliks agronoomile: temperatuuri-režiim hoidlas on rikutud, hädaoht tuleb kiiresti likvideerida.

Kaugustermomeetrid on uus sõna põllumajanduses kasutatavate aparaatide nimistus.

Samasugused seadmed ootavad rakendamist ka paljudes teistes teaduse ja tehnika harudes.

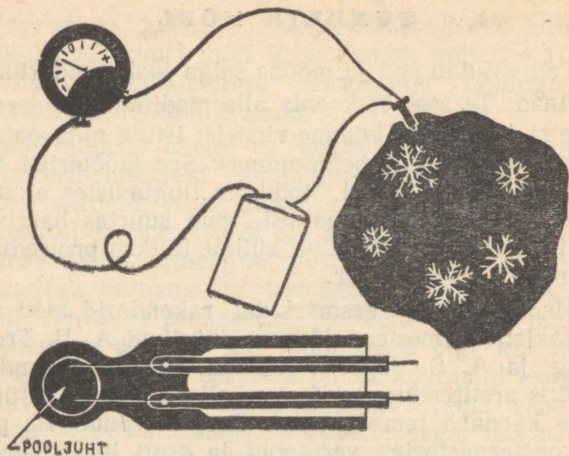
Meteoroloogid vajavad andmeid pilvetaguste kõrguste, geoloogid aga maakera sügavuste temperatuurist. Igal pool on termistor kõige lihtsamaks ja efektiivsemaks temperatuurimõõtjaks.

Teil valutab pea ja mööda selga jooksevad külma värinad. Te asetate kaenla alla meditsiinilise termomeetri ja minutit kümme-viisteist istute ning ootate, kuni tõuseb elavhõbedasammas. See mõõteriist töötab üsna laisalt. Tõsi, kodustes tingimustes ei põhjusta ta suuri ebamugavusi, kuid suurtes haiglates on temperatuurimõõtmine küllalt tülikas protseduur. Teine asi on termistor.

Meditsiinilistel eesmärkidel rakendasid meil termotakistit esimestena Moskva füüsikud A. B. Fromberg ja A. S. Jegorov-Kuzmin. Poole sekundiga mõõtis arstiteaduse professor selle aparaadiga füüsikute käenaha temperatuuri. Seejärel puudutas professor termistoriga veresoont ja osuti liikus tunduvalt. Aparaat fikseeris isegi vaevaltmärgatavat temperatuuride vahet. Professorit ümbritsevad arstid sattusid valmistusse.

Hiljem valmistas Leningradi Agrofüüsika Instituudi kaastöötaja V. G. Karmanov mitu tüüpi niisuguseid seadmeid — mikrotermistore ehk mikroelektrotermomeetreid. Leiutaja nimetas neid «nõelteks». Kujult sarnaneb «nõel» teritatud pliiatsiga, mis lõpeb pooljuhist kerakesega. Kerakese diameeter ulatub poolest millimeetrist kuni viiekümne mikronini (50 mikronit on inimese juuksekarva jämedus). Tibatilluke tükike pooljuhti on väljast kaitstud õhukese klaaskestaga, pooljuhi sisse on viidud kaks plaatinatraati, mis annavad voolu.

Selleks et aparaat kajastaks temperatuurimuutusi kiiremini ja täpsemalt, on pooljuht-kerake tehtud väga väike. Seetõttu ta soojeneb ja jahtub kiiremini. «Nõel» fikseerib senitabamatuid temperatuurikõikumisi, mis toimuvad kümnendike, isegi sajandike sekundi murdosade vältel.



Üks mikroelektrotermomeetritest. Mõõteriist on niivõrd miniatuurne, et temaga võib mõõta lumehelbe temperatuuri.

All — mikroelektrotermomeetri «nõela» skeem.

On termistore, mille tundlik element on nii väike, et neid võib viia otse söögitorru või makku. Mikroskoopiline kerake mõõdab veatult vere temperatuuri vahetult veresoones. Moskva kirurgiliste aparaatide ja instrumentide teadusliku uurimise instituudis on valmistatud terve rida erinevaid meditsiinilisi elektrotermomeetreid, mida kasutatakse juba praktikas. On ehitatud mikrotermistore, mis ühevõrra täpselt mõõdavad temperatuuri -70° kuni $+250^{\circ}$. Nii-sugune lai mõõtepiirkond ühenduses kiire reageerimisega avab uuele aparaadile laia tee kõige erinevamatel tehnikaaladel.

Kui head ka ei oleks termotakistid, üks puudus on neil siiski: nad ei kannata liiga kõrgeid temperatuure. On aparate, mis taluvad +250, +300 kraadi Celsiust. Kuid see on seni ka piiriks. Kuumutage pooljuhti veidi tugevamini ja te rikute ta lootusetult.

Seejuures on nõudmine lihtsate ja häireteta töötavate temperatuurimõõtjate järgi piirkonnaga 900, 1000 ja rohkem kraadi väga suur. Metallurgid ja masinaehitajad kaebavad juba ammu, et olemasolevate meetoditega on raske saavutada vajalikku temperatuuri mõõtmistäpsust nii metalli sulatamisel kui ka detailide karastamisel.

Kas tõesti on pooljuhtidefüüsika siin võimetu?

Ei, probleemi saab lahendada.

Me mainisime varem isolaatoreid, mis tugeval kuumutamisel muutuvad pooljuhtideks. Nüüd võib neile leida rakendusala. Valmistame niisugusest materjalist varda ja asetame ta ahju. Selle järgi, kuidas muutub varda elektrijuhtivus, saab otsustada tema temperatuuri üle. Selliseid raskestisulavaid vardaid on valmistatud Leningradi Uljanovi-(Lenini-)nimelises Elektrotehnika Instituudis.

Varras üksi ei ole veel kõik. Teda on ju vaja lülitada veel elektriahelasse. Kuidas seda teha? Ahjusolevat varrast metalltraatidega ühendada ei tohi. Kõrgel temperatuuril algavad otsekohe keemilised reaktsioonid, ühenduskohtadel moodustub hapendikiht ja kontakt muutub halvaks.

Varda otsi läbi seina välja tuua ka ei saa, sest väljatoodud otsad jahtuvad ja kaotavad pooljuhiomadused, s.o. muutuvad otsekohe isolaatoriteks ja ei juhi enam elektrivoolu.

Selleks et leida väljapääsu, tuleb otsida kõrvalteid, muuta seade keerulisemaks.

Muuseas, on olemas veel üks suurepärane temperatuuri mõõtmise viis. Kasutades seda teed, pole vaja termomeetrit asetada vahetult kuuma keskkonda või selle lähedale, vaid temperatuuri võib mõõta ka teatava vahemaa tagant.

TEMPERATUURI MÕÕTMINE KAUGUSEST

Päike asub meist 150 miljoni kilomeetri kaugusel. Keegi pole temani lennanud, keegi pole teda termomeetriga puudutanud, ja ometi on selle taeva-keha pinnatemperatuur teadlastele täpselt teada. Need andmed tõi kohale päikesevalgus ise.

Kui päikesekiir jõudis Maale, sattus ta füüsikalaboratooriumisse. Siin asetati ta teele klaasprisma, mille läbimisel kiir muutus pikaks vikerkaarevärviliseks ribaks ja oleks nagu öelnud: näe, missugune ma olen, kõik minu saladused on nähtavad; nüüd arvake ära, missugune kuumus on minu kodumaal.

Enne seda sooritasid teadlased katseid harilike, maapealsete kiirtega, nendega, mida kiirgab iga kuumutatud ese. Ka need kiired andsid prisma läbimisel pika spektri. Kiired erinevate temperatuuridega kehadelt andsid erinevaid spektreid. Kuumutades keha kuni 1000 kraadini, langes kõige suurem kiirgusenergia hulk spektri punasesse ossa; kuumutades 2000 kraadini, vähenes punasele spektriosale langev energiahulk, kasvas aga kollasesse ossa langev energia. Tõusis temperatuur juba 3000 kraadini, ilmnes energiaküllus spektri sinises osas jne. Füüsikud sooritasid palju niisuguseid katseid ja lõpuks

avastasid sõltuvuse temperatuuri ja energiajaotuse vahel spektris.

Kui sõltuvus oli juba teada, siis ei tulnud ka päikesekiire spektri kohal kaua pead murda. Selgus, et tema kodumaal, Päikese pinnal, on temperatuur +6000 kraadi Celsiust.

Te küsite: aga mis puutub siia raamatu kangelane — pooljuht?

Küsimus on põhjendatud.

Selgub, et kõige mugavam ja täpsem on hinnata spektri erinevate osade energiat spetsiaalse pooljuht-termistoriga.

SUUREPÄRANE BOLOMEETER*

Õhukese plaadi kujuline miniatuurne termotakisti värviti mustaks ja suleti klaasballooni. Balloonist eemaldati õhk, et väliskeskkond ei segaks aparadi tööd. Saadi niinimetatud bolomeeter. Must värv neelab kogu plaadile sattuva kiirgusenergia. Neelatav energia muutub soojuseks ja soojendab termistori.

Termistori materjal on valitud niisuguste kaalutlustega, et ka kõige väiksemad temperatuurikõikumised muudavad tunduvalt termistori elektrijuhtivust. See võimaldab pooljuhtbolomeetriga mõõta kõige tühisemaid kiirgusenergia annuseid. Temaga saab registreerida näiteks kiirgusenergia suurust spektri erinevates osades.

Uurides bolomeetriga ahju soojusliku kiirguse spektrit, võite te määrata, missugusesse spektriossa on seal koondunud suurem osa energiast. Nende andmete põhjal saate teada temperatuuri lausa raskesti-usutava täpsusega — sajatuhandikuni kraadist.

Aparadi ülesseadmine ja arvutused on iseenesest

* Kiirgusemõõtja.

küllaltki vaevanõudev töö, kuid kõike seda saab mehhaniseerida.

Nüüd seame endale teise ülesande: mõõta tumeda mittekiirgava kuumu eseme temperatuuri teatava vahemaa kaugusel.

Kas tõesti ka see on võimalik?

Traadist alusel on malmtriikraud. Kas ta on kuum või külm, seda välimuse järgi ei ütle. Kas tuleks teda puudutada? See pole ilmtingimata vajalik. Pange peopesa triikraua ligidale ja te tunnete, kuidas metall kiirgab soojust. Võib-olla tunnete te ainult sooja õhu mõju? Ei, õhk ei mängi siin mingit osa, sest korrates seda katset tühjuses, tunnete te samuti soojust. Selgub, et see on sama kiirgusenergia, mida kiirgab iga kuum keha, ainult siin on kiired nähtamatud. Neid kiiri nimetavad füüsikud infrapunasteks kiirteks. Nagu valguskiiredki võivad nad prisma läbimisel murduda, andes nähtamatu spektri. Igale temperatuurile vastab oma kindel erinev spekter. Pooljuhtbolomeetriga saab infrapunast spektrit uurida mitte halvemini kui nähtavat. Tähendab, triikraua temperatuuri võib määrata ka teatava vahemaa tagant.

Ka lihtsalt soojad esemed kiirgavad infrapunaseid kiiri. Näiteks on nende kiirgumise allikaks inimese nahk. Kas inimese keha temperatuuri on samuti võimalik mõõta teatavalt kauguselt? Ei, seni pole see õnnestunud, sest tekib terve rida tehnilisi raskusi. Kuid keegi ei ole öelnud, et tee on suletud. Võib-olla pole kaugel aeg, kus ilmub meditsiiniline kaugpooljuht-termistor. Haiget häirimata saab arst eemalt teada tema temperatuuri.

Pooljuhtbolomeeter on erakordselt tundlik. Seda märkame eriti selgesti lihtsal soojuskiirguse registreerimisel (ilma temperatuuri mõõtmiseta). Asetades niisuguse seadise paraboolse nõguspeegli fookusesse,

võlts juba kaugelt fikseerida ka kõige väiksema ebanormaalse kuumenemise töötavas masinas. Aparaat registreerib hõlpsasti lendava linnu soojuse ja avastab põleva paberossi mõne kilomeetri kauguselt.

On tehtud niisugune katse. Nähtamatu infrapunane kiir saadeti Maalt Kuule. Kiir peegeldus Kuu pinnalt, pöördus tagasi ja püüti kinni pooljuhtbolomeetriga.

Me veendusime, et termotakistid on soojusepüüdjana ja temperatuurimõõtjatena laialdaselt kasutusel alates arstiteadusest kuni metallurgiani, maakera sügavustest taeva kõrgusteni, isegi kuni Kuuni.

Kuid kas termistore saab kasutada ainult termomeetritena?

PUHANGU JÕUD

Puhanguga me kustutame küünla. Selgub, et samal viisil on võimalik sisse lülitada ka valgust.

Moskva Polütehnilises Muuseumis demonstreeritakse huvitavat automaatset mänguasja. Teie ees on tibatilluke termistor. Puhute talle kergelt ja teie kõrval süttib lamp.

Süttib ja varsti kustub. Mis siis juhtus?

Puhumise tagajärjel muutus temperatuur ja järelikult ka pooljuhi elektrijuhtivus. Aparaaati läbiv vool suurenes ja lülitas sisse relee, mis süütas lambi. Niisugune on termistoriga töötav lihtsaim automaatrelee.

See automaatika printsiip aga leiab palju tähtsama rakendusala.

Mööda magistraalitorustikku voolab linna kuum gaas. Selleks et see satuks takistusteta meie korteritesse, tuleb pidevalt jälgida ja reguleerida gaasivoolu torus. Eriti on vaja teada nähtamatu voolu kiirust.

Kõige kergem, lihtsam ja täpsem on teostada niisuguseid mõõtmisi termistoridega.

Kui termotakistid paigutada torusse, soojendab neid kogu aeg gaasivool, kuid samal ajal nad ka jahutavad, andes soojust gaasile.

Mida suurem on gaasivoolu kiirus, seda tugevamini jahtub termistor — soojus nagu puhutakse talt ära. Termistor «külmub» ja voolutugevus väheneb.

Nii saab mõõta gaasijoa kiirust, et hiljem auto maatselt juhtida ta liikumist.

Kombineerides mitut termotakistit, on võimalik määrata isegi gaasivoolu suunda. Nähtamatud keerised paljastavad oma keerulise struktuuri: nad nagu muutuksid nähtavaiks.

MISSUGUSES JÄRJEKORRAS HAKKAVAD MOOTORID TÖÖLE

Kell puudub üks minut kaheksast. Metallitöötlemise tehase hiigelsuures automaattsehhis on kõik valmis uueks tööpäevaks. Tuhanded elektrimootorid ootavad sisselülimist.

Valveinsener läheb lüliti juurde ja tõstab kiire liigutusega üles selle kolmeharulise käpa.

Kuid mootorid ei hakanud mitte kohe undama. Kõigepealt hakkas pöörlema ühe mootori rootor, mõni sekund hiljem teine, siis kolmas, neljas... Mürin kasvab, valgub laiali mööda tsehhi ja juba on kõik ümberringi peensusteni arvestatud liikumises.

Miks ei hakanud mootorid tööle korraga?

Teisiti ei ole võimalik, sest nende üheaegne sisselülimine täis võimsusele oleks liiga järsult muutnud koormust elektrivõrgus. Ja ka mootorid ise ei suuda alustada tööd kohe maksimaalse pöörete arvuga — nad saavutavad selle alles järk-järgult.

Kuid miks hakkasid mootorid tööle üksteise järel, kuigi lülitati oli kõigil ühine?

Siin oli mootoritevahelises energiajaotussüsteemis rakendatud jällegi pooljuhte.

Elektrivool suundub mootorisse läbi termistori. Esimesel momendil peale lülitamist on pooljuhi temperatuur madal ning ta juhib voolu halvasti. Elektrimootor ei saa küllaldaselt energiat ja tema võll veel ei pöörle. Kuid voolu mõjul pooljuht järk-järgult soojeneb, tema takistus väheneb, vastavalt sellele kasvab voolutugevus, see omakorda kuumendab termistori ja vähendab tema takistust.

Ja lõpuks hakkab pöörlema mootori rootor. Nüüd pole termotakistus enam vajalik ja lihtne automaatseade lülitab ta välja.

Nii on ka kõigi teiste mootoritega. Selleks et nad alustaksid tööd kindlas järjekorras, asetatakse neile erinevaid termistore. Need võivad mootoreid sisse lülitada mitmesuguste ajavahemikkude järel — alates sekundi murdosast kuni mõne minutini.

Veel mõni aeg tagasi, kui termistore ei tuntud, oli niisuguste ülesannete lahendamine inseneridele võrdlemisi raske. Pidi kasutama keerulist ja kapriisset elektron-ajareleed, sageli aga isegi kellamehhanisme. Nüüd on kõik muutunud võrratult lihtsamaks, odavamaks ja, mis peamine, töökindlamaks.

KÕRGAHJU HINGUS

Palju vaeva on kõrgahju teenindamisega! Talle tuleb õigeaegselt ja rangelt määratud koguses anda «toitu» — särdamispanust, tuleb hoolikalt jälgida tema «hingust», s. o. õhu juurdevoolu. Seejuures peavad ahju puhutava õhu hulk, temperatuur ja niiskus olema kogu aeg ühesugused.

Tänapäeva malmitööstuses ei saa kõrgahjude režiime reguleerida käsitsi ega silma järgi. Mis juhtub, kui ei märgata mõnd piasija? Oletame, et päike hakkas paistma soojemalt ja õhk muutus kuivemaks. Inimene seda ei märganud, sest samas õhkab kuumust suur kõrgahjumürakas. Kuid kõrgahi märkas seda. Kohe muutus ahju «käik», muutus halvemaks ka malm. Seepärast ongi insenerid varustanud kõrgahjud terve rea automaatidega, mida inimene võib täielikult usaldada.

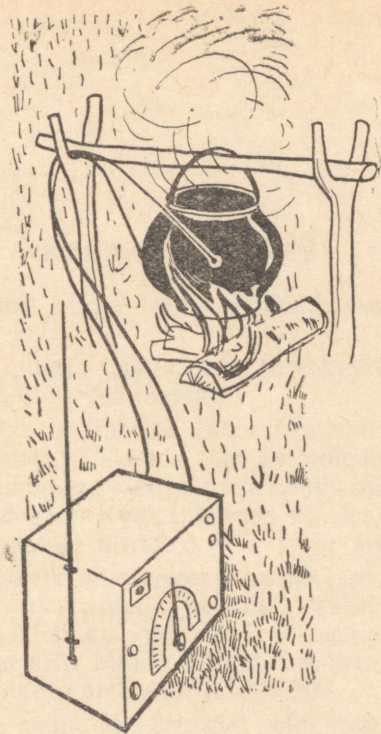
Üks tähtsamaid kõrgahju seadiseid on automaatne õhuniiskuse regulaator. Tema põhiosaks võib suurepäraselt olla termistor.

Riidega kaetud termotakisti asetatakse õhuvoolu ja niisutatakse kogu aeg kunstlikult. Riie kuivab õhuvoolus nagu pesu tuules. Kuid auramisega kaasneb alati jahtumine (meenutage, kuidas hakkab külm peale suplemist tuulise ilmaga). Pesu kuivab paremini selge ilmaga. Tähendab, kuivas õhus aurab niiskus kiiremini ja järelikult on ka jahtumine suurem. Samuti jahtub termistor ja kohe väheneb aparaati läbiv vool. Voolumuutuse võtab vastu mehhanism, mis lisab õhule veeauru. Seega hoitakse õhuniiskus automaatselt ühesuurune.

Teised seadmed reguleerivad õhutemperatuuri ja -hulka. Automaadid garanteerivad kõrgahju rahuliku ja ühtlase «hingamise».

Termotakisti kasutamisest võiks veel palju jutustada. Kuid selletagi on selge, kui suur on nende lihtsate aparaatide praktiline tähtsus.

Termistorid kehastavad ainult üht pooljuhi omadust: elektrijuhtivuse järsku olenevust temperatuurist. Pooljuhi kuumutamisel ilmneb veel teine iseärasus, mis on natuke keerulisem, kuid erakordselt huvitav ja oluline tehnika arengus. Selle juurde me praegu lähemegi.



SOOJUSE PÜÜDMINE

METSAONNIKES

Oleme linnast kaugel taigas, läbipääsmatus metsatihnikus.

Võimsate, lumega kaetud kuuskede keskel, madalates onnides, asub jahimajand.

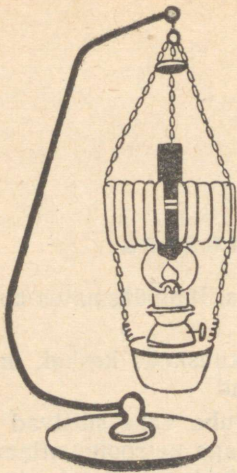
Talvine päev on lühike. Juba vara süttivad jäämustritega kattunud akende taga petrooleumilambid. Ligineva pimedusega saabub ümberringi rahu ja vaikus. Taiga magab. Kuid inimesed on ärkvel, olles seotud nähtamatute niitude kaudu kogu maailmaga.

Astuge ükskõik missugusesse majakesse. Te kuulete Spasski tornikellade helinat, kuulsa teadlase häält pealinnast ja kaugete maade muusikat. See on raadio. Ta on eriti hinnas kõrvalistes maakohtades, kuhu veel ei ulatu elektriülekanaliinid.

Vastuvõtja ammutab energiat elektripatareidest. Kui patareid on korras, täitub tuba helidega laiast maailmast. Võib aga juhtuda, et patareid lakkavad töötamast. Kui nende energia on ammendatud, muutub vaikseks ja üksildaseks. Alles hiljuti loeti seda möödapääsmatuks nähtuseks, kuid nüüd võib patareivastuvõtja töötada ilma patareideta.

Lae all ripub keti küljes imeliku välimusega petrooleumilamp. Tema ülemises osas on metallplaati-dega ümbritsetud tume toru. Näib, nagu oleks lambi kaela ümber pandud vanaaegne krae «žaboo».

Termoelektrogeneraator petrooleumlambil.



«Krae» juurest ulatub juhtmepaar kõrvalseisva vastuvõtjani «Rodina».

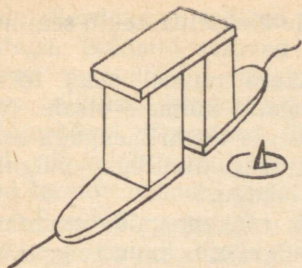
Öhtul tuleb jahimees või metsavaht koju ja süütab lambi. Toas muutub valgeks. Möödub mõni minut ja vastuvõtja nagu ärkaks. Häälestamiseskaala muutub valgeks ja tugevneb kaugel linna hääl.

Mispärast elustus vastuvõja?

UUS OMADUS

Varem rääkisime me üksikasjaliselt kahesugustest — elektron- ja aukjuhtivusega — pooljuhtidest. Esimeses vabanevad kuumutamisel elektronid, teises tekivad augud.

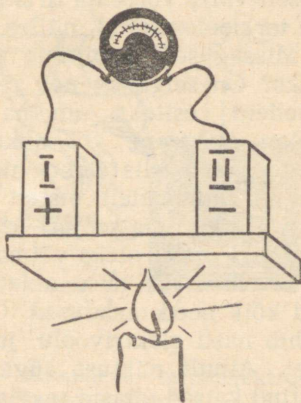
Valmistame mõlemat liiki pooljuhist väikese pulgakese, asetame nad kõrvuti ja joodame nende ülemistesse otstesse metalliplaadikese. Saame mingisu-



Lihtsaim pooljuht-
termopaar.

guse vene keele «Π» sarnase eseme — nn. termopaari või termoelemendi. Nüüd asetame pulgakeste joodetud otsad (tähe ülemise põikpuu) kuhugi sooja, samal ajal aga jahutame vabu otsi.

Elektronjuhtivusega pulga soojendatavale otsale ilmuvad kuumutamisel vabanenud elektronid. Need hakkavad omavahel tõuklema ja lendavad igale poole laiali. Seejuures paljud rändavad pulga külmale otsale, sinna, kus on vabam ja vähem «tunglemist». Kuid me teame, et elektronid on negatiivselt laetud osakesed. Järelikult, niipea kui pulga



Paremal — elektronjuhtivusega, aga vasakul — augulise juhtivusega pooljuhisambake. Sambakeste otstele kogunevad soojuse mõjul vabanenud elektrilaengud.

Nii muutub soojus elektrienergiaks.

külmal otsal ilmneb nende üleküllus, tekib seal negatiivne elektrilaeng.

Aukjuhtivusega pulgakese kuumal otsal tekivad augud, mis paiknevad samuti külmale otsale. Nagu te mäletate, on auk positiivse elektrilaenguga osake. Tähendab, termopaari aukjuhtivusega pulgakese külm ots saab positiivse laengu.

Neid laenguid on seda rohkem, mida suurem on temperatuuride vahe pulgakese kuuma ja külma otsa vahel.

Seega ilmusid termopaari külmadele otstele erinimelised elektrilaengud. Kui need otsad ühendada traadiga, voolab traati mööda elektrivool. Soojus muutub elektrienergiaks. Sama toimub ka meie lam-bis.

«KRAE» SALADUS

Võtame lambi, millest meil eespool juttu oli, ja vaatame ta «krae» alla. Seal on tihedalt üksteise kõrval hallid, tuhmilt läikivad tulbakesed, mida suuruselt võiks võrrelda iiristega «Kuldvõtmeke». Need on termoelemendid, milles tekibki elektrivool.

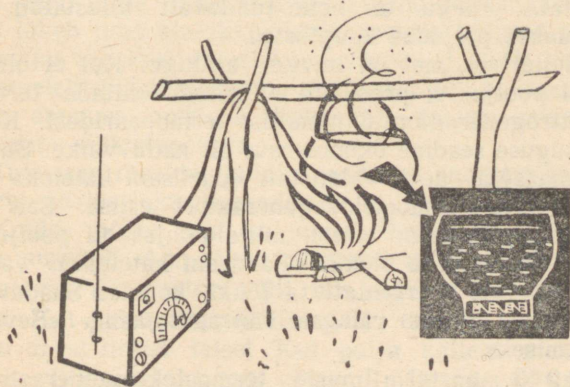
Missuguseid pooljuhte võib kasutada termopaari-deks? On selge, et nad peavad rahuldama järgmisi nõudeid: esiteks, andma kuumutamisel vajaliku hulga elektrone või auke; teiseks, hästi juhtima elektrivoolu (siis elektronid või augud lähevad kergemini kuumadelt otstelt külmadele); kolmandaks, halvasti juhtima soojust (et temperatuuride vahe termopaari otstel oleks võimalikult suurem).

Ei ole kerge leida ainet, millel samaaegselt oleksid kõik need omadused. On teada, et materjal, mis juhib hästi elektrivoolu, juhib suurepäraselt ka soojust. Ainult nähtuse sügav teoreetiline analüüs ja paljud katsed aitasid teadlastel luua vajalikke mater-

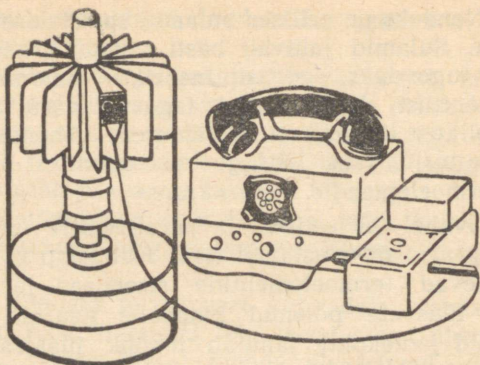
jale. Nendeks on erilised sulamid spetsiaalsete lisanditega. Sulamid juhivad hästi voolu, lisandid aga nagu tugevdaks, «distsiplineeriks» aatomite sisemist ehitust, hoiaks neid tagasi ülearu tugevast soojuslikust liikumisest. Tulemusena väheneb materjali soojusjuhtivus. Niisugustest sulamitest ongi tehtud termoelemendid meie «kraes».

Omavahel järjestikku ja paralleelselt ühendatud termopaarid moodustavad toru. Kui lamp põleb, siis soojenevad termoelementide sisemised jootekohad tahilt tõusvate põlenud kuumade gaaside toimel. Väliseid jootekohti jahutab toaõhk plaatradiaatori kaudu (neid plaate me võrdlesimegi «žabooga»). Temperatuuride vahe ulatub 250 kuni 300 kraadini. Sellest energiast jätkub mitmelambilise raadiovastuvõtja toitmiseks.

Suurepäraselt valgusallikat, mida me vaatlesime eespool, nimetatakse petrooleum-termoelektrogene-



«Partisani katelok» — tänapäeva termoelektrogeneraatorite «vaarvanaisa».



Termoelektrigeneraator petrooleumgaasil.
Aparaat toidab energiaga kolhoosi raadio-
jaama «Urožai».

raatoriks. Praegu pole niisugune seade enam harulduseks. Esimesed näidiseksemplarid ilmusid 1950. aastal, praegu on neid tunduvalt täiustatud ja müüakse paljudes kauplustes.

Sellel seadmel on huvitav ajalugu. Kui ei olnud veel pooljuhte, proovisid füüsikud ehitada termoelektrogeneraatoreid metallist termopaaridest. Kuid niisuguse seadme ökonoomsus oli kaduvväike. Suure Isamaasõja päevil valmistati «partisani katelok» — tänapäeva termoelektrogeneraatori esiisa. See oli malmpajakujuline anum, mille põhjas oli pooljuht-termoelementide blokk. «Partisani katelokki» valati külma vett ja riputati ta lõkke kohale. Saadavast energiast piisas väikese väliraadiojaama «Sever» toitmiseks.

1946. aastal ilmusid termoelektrogeneraatorid teemasinates. Nende kasutegur oli juba küllaltki kõrge — ligi 4% (niisuguse osa soojusenergiast

muundasid nad elektrienergiaks). Viis aastat hiljem ehitasid nõukogude füüsikud puudega köetava termoelektrogeneraatorahju. See andis 100—200 vatti elektrienergiat.

Praegu hakkab tööstus tootma TGU-1 tüüpi termoelektrogeneraatoreid võimsusega 16 vatti. See töötab petrooleumgaasil ja toidab kolhoosi raadiojaama «Urožai». Välilaagrites naerdakse: meie sidetöölised on muutunud kokkade sugulasteks. Nali naljaks, kuid petrooleumgaasil valmistatud energia on odavam kui patareienergia. Neid küsimusi uurivad ka välismaa füüsikud. Ameerikas näiteks on ehitatud seadis, kus elektrienergiaks muundatakse põleva gaasi soojus.

UNISTUS TÄITUB

Missugune imelik kombinatsioon: petrooleumilamp ja pooljuhid. Siin on liitunud minevik ja tulevik. See, mille inimene avastas sajandeid tagasi ja mis läheb juba ajalukku, leidis toetaja suurepärasel tuleviku tehnikat rikastavas avastuses. Meie lihtne termoelektrogeneraator on ju füüsikute ja inseneride ammuse unistuse täitumine: soojus muutub vahetult elektrivooluks.

Tuletame meelde, kuidas saadakse energiat tänapäeva soojuselektrijaamades.

Koldes põlev süsi soojendab katlasolevat vett, mis aurustub. Aur paneb pöörlema turbiini, viimane omakorda generaatori võlli, mis annabki elektrienergiat. Kui palju etappel! Kui palju energia muundumisi ühest liigist teise! Kui palju kalleid mehhanisme, liikuvaid osi, mis vajavad määrimist ja kuluvad!

Aga mis toimub tänapäeva aatomielektrijaamas?

Tuumaenergia eraldub reaktoris peamiselt soojustena. See soojus eemaldatakse reaktorist ja kulutatakse samuti auru saamiseks. Edasi läheb nagu hariikus soojuselektrijaamas — järgnevad turbiinid ja generaatorid. Ühe sõnaga, soojusest kuni elektrini on jällegi pikk kaudne tee. Uuesti keerulised mehhanismid ja vältimatud energiakaod.

Hoopis teine asi on termoelemendiga. Temas muutub soojus elektrienergiaks vahetult, ilma igasuguste vahelülideta.

Juba meie päevil on pooljuhtidest termoelemente kasuteguriga kuni kaheksa, laboratoorses tingimustes aga isegi kuni kümme protsenti. Seda ei ole vähe. Niisama suur on ka väikeste aurujõuseadmete kasutegur. Tõenäoliselt on juba üsna varsti kasulik väikesed soojusmasinad (võimsusega kuni 100 kilovatti) üle viia termoelektrogeneraatorite toitele.

Praegu püüavad teadlased kahekordistada termopatarei kasutegurit. Siis võrduks ta keskmiste soojuselektrijaamade kasuteguriga. Kuid tulevikus saab termoelementide ökonoomsust veelgi tõsta. Ja kui täna pooljuhid ei asenda veel elektrijaamade hariikku sisseseadet, siis täiustudes muudavad nad kahtlemata energeetika palet. Tuleb aeg, kus elektrivoolu saadakse vahetult elektrijaama koldest või aatomielektrijaama reaktorist.

Tähtis on aga see, et pooljuht-termoelemendid suudavad kasu tuua mitte ainult tööstuslikus elektrienergeetikas, vaid kogu meie rahvamajanduses. Nad avavad täiesti uue tee energia saamiseks, tee, millest insenerid varem isegi ei unistanud.

Külmade talveilmadega kleebivad heaperemehelikud majahoidjad majade sissekäikudele plakateid: «Hoidke soojust! Sulgege ukсед!»

Hoidke soojust! See üleskutse õigustab end mitte üksnes talvel ja mitte ainult majade kütmise seisukohalt.

Kas te teate, kui suurt osa kütteaine — söe, turba, gaasi ja puu põletamisel saadavast soojusest kasutab inimene? Mitte rohkem kui üht viiendikku, sest kõik ülejäänud haihtub kasutult atmosfääri.

Miks läheb nii suur hulk soojust kaduma?

Asi on siin järgmine.

Meie käest libiseb ära see soojusenergia, mis on aine massis ja millel on madal temperatuur. See soojus peitub näiteks tööstusettevõtete roiskvetes, tehaste korstnate suitsus ja metallurgiaahjude heitegaasides. Esimesel pilgul tundub tõepoolest võimatu seda kasutada. Proovige teed keeta 15 kraadise soojusega! Te ütlete, et see pole võimalik. Kuid kas saab kütta hoonet niisuguse veega? Tõenäoliselt vastate, et ka see ei ole võimalik, olgu vett kui tahes palju. Kaua aega oldi sellisel arvamusel ja seepärast loobuti kergekäeliselt soojuslikest jääkidest. Kuid siis tuldi mõttele tõsta vee temperatuuri veesurve tõstmisega.

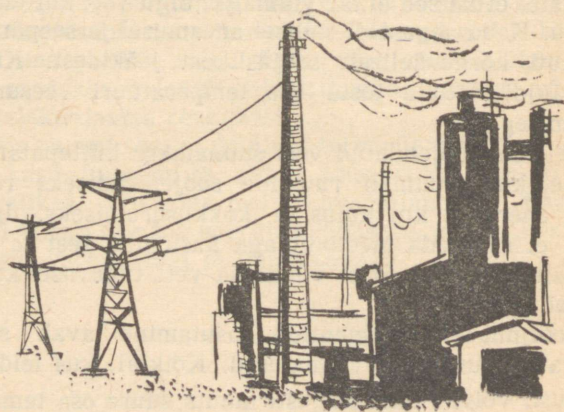
Sel teel soojendatud vesi suunatakse küttepatareidesse, kus ta annab ruumide soojendamiseks rohkem energiat, kui kulus ta kokkusurumiseks. Igal pool ei saa seda meetodit aga kasutada, sest ta on küllalt keeruline ja ei võimalda vett tugevasti kuumutada.

Pooljuht-termoelementide kasutamine avab siin võrratult suuremad võimalused. Kõikjal, kus leidub soojust, võivad nad kergesti muuta suure osa temast

kõige mugavamaks energialiigiks — elektriiks. Elektrienergiat saab kasutada tuhandel viisil — kas muuta ta kohe valguseks või masinate liikumiseks, juhtida traate mööda suurtele kaugustele või koguda tagavaraks «elektrihooldlasse» — akumulaatorisse.

Iga suitsukäiku, iga korstnat kas kuuma või lihtsalt sooja gaasiga, samuti sooja äravooluvett võib varustada pooljuht-termoelementide patareide rõngaga. Seda tehes muundub senine heitsoojus elektrivooluks, paneb liikuma masinaid, toidab aparate ja valgustab tänavaid. Varustades katlamaju elumajades termopatareidega, võime me saada peale soojuse niipalju elektrienergiat, kui tarvitatakse kõikide elanike majapidamises, kaasa arvatud ka elektriliidid, külmutuskapid, tolmuimejad.

Autojuhid või autoomanikud, sattudes kuhugi mahajäänud nurgakesse, näevad palju vaeva akumulaatori laadimisega. Pooljuhid päästaksid nad sellest murest, sest automootori heitegaasidel on küllalt



kõrge temperatuur. Kui väljalasketoru ümbritseda termoelementidest rõngaga, siis saamegi voolu akumulaatoreile.

Kes teab, võib-olla tulevikus, kui pooljuhtmaterjale on palju, laotakse tehaste korstnaid mitte tellistest, vaid pooljuhttermopaaridest. Korstnas on kuum suits, väljas aga jahe õhk. Pooljuhttellistest sünnib elektrienergia ja nii muutub korsten elektri-jaamaks.

Aga kui ehitada termoelementidest kõrgahi? Saame kaksiktööstuse: kõrgahi-elektri-jaam. Muidugi on see aeg veel kaugel. Enne tuleb leida pooljuht, milles on ideaalselt ühendatud vajalikud omadused ja mida saab valmistada odavamalt kui tsementi. See on väga raske ülesanne, kuid iga päev toob meid lahendusele lähemale.

ENERGIA MAAPÕUEST

Juba ammu töötab teadus probleemi kallal, kuidas kõige paremini kasutada söelademeid, s. o. kuidas teostada söe maa-alust gasifitseerimist. Selle asemel et sütt lademetest lahti raiuda ja maapinnale tõsta, pumbatakse maapõue hapnikku ja süsi põletatakse vahetult maa all. Tahke kütus põleb seal ainult osaliselt. Põlemisprotsessis tekib gaas, mis on ühel ajal nii suurepäraseks kütuseks kui ka hinnaliseks tooraineks keemias. Seda gaasi võib juhtida tehastesse, keemiakombinaatidesse ja elukorteritesse.

Maa-aluse gasifitseerimisega hoiame kokku tohutul hulgal tööjõudu ja -vahendeid, kuid peamine on see, et inimene vabaneb raskest maa-alusest tööst. Ent kui palju soojust läheb asjatult kaduma, kuludes maapõue soojendamiseks.

Ümbritseme maa-aluse gasifitseerimise jaama

puurauke, mida mööda tõuseb maa-alustest etest kuum gaas, pooljuht-termoelementidest blokkidega. Kui palju väärtuslikku energiat saame sellest lõõmavast lademest!

Pooljuhid võivad hankida elektrienergiat ka looduslikest soojusallikatest.

Baškiirias Jurjurani jõe ääres nimetavad ümberkaudsed elanikud üht kaldaäärset küngast Jagan-Tau — Kuum mägi. Niisugune nimetus on täiesti õigustatud. Künka sisemuses hõõgub põlevkivi ja pragudest paiskuvad kuuma auru joad. Et see kün-gas muutuks elektri-jaamaks, on küllaldane, kui lüüa temasse pooljuhtidest vaiad.

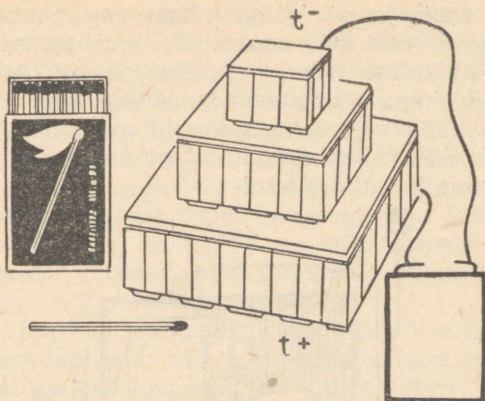
Saavutades pooljuhtmaterjalide külluse, võime me muuta geisrite, maa-aluste gaaside, põhjavete ning päikese soojuse elektrienergiaks. Siin avavad pooljuhid tõepoolest piiritud perspektiivid. Me räägime neist veel edaspidigi.

Praegu pöördume aga tagasi termopaaride juurde, et jutustada nende teistest huvitavatest omadustest.

ELEKTROONNE KÜLM

Pooljuht-termoelektrigeneraatorite idee sündis Leningradis Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia pooljuhtide laboratooriumis, mille baasil hiljem moodustati Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia Pooljuhtide Instituut. Siin kerkis üles ka teine mõte: ehitada uus originaalne külmutusseade, mis töötab pooljuhtidel.

Me teame, et kui üht termopaari otsa soojendada ja teist jahutada, siis saame elektrienergiat. Ilmneb, et on olemas ka vastupidine efekt: laske läbi termopaari alalisvoolu, ja ta hakkab ühest otsast soojenema, teisest aga jahtuma.



Pooljuhtjahutuspatarei.

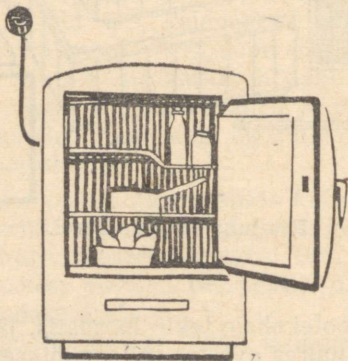
Külmale jootekohale tekib härmatis, jää.

Metallide juures avastas selle nähtuse 1834. aastal prantsuse füüsik Jean Peltier. Aasta hiljem külmutas Peterburi akadeemik E. H. Lenz elektrivooluga antimon- ja vismutvarraste jootekohal veetilga. Sellele huvitavale nähtusele leiti kasulik rakendus alles meie päevil. Asi on selles, et pooljuht-termopaarides on Peltier' efekt võrratult tugevam kui metallis.

MOOTORITA KÜLMUTUSKAPP

Mitu pooljuht-termopaari ühendati järjestikku ja moodustati neist plaat. Voolu sisselüümisel plaat pealt jahtus, alt aga soojenes. Valmistati veel teine samasugune plaat, mis asetati esimesele soojade jootekohtadega allapoole ja lülitati sisse vool. Alumise plaadi külmad jootekohad jahutasid pealmise

plaadi sooje jootekohti ja tulemusena muutus teine plaat pealt veel külmemaks. Niisugust mitmekihilist pooljuhtplaatide virna — termopaaride blokki — on väga mugav kasutada kunstliku külma saamiseks. Ei ole vaja mingisuguseid mootoreid, pumpi ega vedelikke, mis varem olid tingimata iga külmutusseadme koostisosadeks.



Pooljuhtkülmutuskapp.

Elektroonse külma loomise lihtsus avab talle laia rakendusala. Võib-olla õige pea varustatakse gaseeritud vee müügikohtades veepaak pooljuhtplaatidega. Ka jäätisemüüjatele on uus kunstlik külm teretunud, sest siis poleks vajadust kaugelt vedada tonnide viisi jääd või tahket süsihapet. Kõikjal, kus on elektrienergiat, võib saada ilma vaevata ka külma.

Väikese kodukülmutuskapi jaoks ei vajata suurt hulka termopaare, vaid piisab ühest kuni kahest ühekorruselisest termopaaride plaadist.

Pooljuhtide Instituudis on juba ehitatud mõned elektronkülmutuskapi mudelid.

Valge kapp — samasugune nagu kõigil teistel külmutuskappidelgi. Kapi taga asub metallplaatidest radiaatorivõrestik, millega on ühendatud pooljuht-termopaaride bloki kuumenevad otsad, et oleks kergem ära anda soojust. Samasugune võrestik (ainult see kogub soojust) on monteeritud külmutuskapi sisse. Tema plaadid on ühendatud nende pooljuhtide otstega, mis jahtuvad, kui elektrivool läbib termopaare. Patarei on väike — mõnekümnest pooljuhtprussist koosnev neljakandiline plaadike. Ja ongi kogu külmutuskapp.

See kapp on palju mahukam kui laialtlevinud külmutuskapp, mida valmistab tehas «Gazoapparat», ja samal ajal ka kümneid kordi töökindlam.

Välja on töötatud pooljuhtkülmutuskappide töösuslik konstruktsioon. Need asetatakse tuntud kappidesse «Gazoapparat» ja «Dnepr». Varsti väljuvad tehase konveierilt lihtsad ja töökindlad elektriaparaadid.

PAHUPIDI PÖÖRATUD KÜLMUTUSKAPP

Huvitav piasia. Muutes külmutuskapi elementides voolu suuna vastupidiseks, võib öelda, et ta pöördub pahupidi. Nüüd soojeneb sisemine radiaator, väline aga jahtub. Nii muutub külmutuskapp omapäraseks praeahjuks.

Voolu ümberlülimisega me asetasime kogu sooja ja külma ümber, vahetasime nende kohad. See on ka arusaadav, sest siis muutub elektronide ja aukude liikumise suund termopaarides vastupidiseks.

Raadiojaamades asetsevad niinimetatud sageduse kvartsstabilisaatorid — need jälgivad lainepikkuse püsivust, millel toimub ülekanne. Stabilisaator paikneb kambris, kus temperatuur peab alati olema ran-

gelt ühesugune, sest vastasel korral vibreerib ta kord kiiremini, kord aeglasemalt, olenevalt temperatuurimuutustest. Et seda ei juhtuks, on kambri asetatud termopaaridest patarei ja termistor. Termistor mõõdab pidevalt temperatuuri, ja kui see mingil põhjusel tõuseb, annab riist otsekohe elektrilise käsu releele, mis lüübib voolu termopaari. Kui aga temperatuur langeb, muudetakse voolu suund automaatselt vastupidiseks ja kamber hakkab soojenema. Pooljuhtaparaadid jälgivad valvsalt kambri temperatuuri.

Niisuguseid termostaate ja külmutuskappe on kerge valmistada vajaduse korral ka väga väikeste mõõtmetega — teeklaasi- või sõrmkübara-suurusena. Ühed neist väldivad mitmesuguste aparaatide pisidetallide liigset kuumenemist, teised jahutavad elavaid kudesid, mikroorganisme ja säilitavad nende temperatuuri mikroskoobi all uurimise vältel. Miniatuurse pooljuhtkülmutuskapi baasil, mis koosneb ühestainsast termopaarist, õnnestus ehitada väga mugav hügromeeter — õhuniiskust mõõtev riist.

Samuti aitab elektrijahutus lahendada palju teaduslikke probleeme.

Kuid füüsikud püüavad praktikas veelgi efektiivsemalt kasutada elektrijahutust ja -soojendust. On tekkinud idee ehitada originaalne hoonete soojendus-jahutussüsteem.

KUNSTLIK KLIIMA

Heidame pilgu tavalisse elumajja tulevikus. Toravad silma mustriksed metallrestid väljas, akende all. Need ei ole kaunistused. Majja astudes näeme aknalaudade all samasuguseid reste. Mis need siis on?

Need on pooljuht-termopaaridest radiaatorid, mis elektrivoolu toimel soojenevad ja tõstavad ka ruumi temperatuuri. Korteriperenaine pöörab lüliti. Nüüd voolab vool vastupidises suunas ja toa radiaatori-plaadid jahtuvad, kogudes üleliigset soojust. Temperatuur langeb kiiresti. Muuseas, niisuguste korterite perenaistel ei tule tõenäoliselt muretseda tubade temperatuuri pärast. Meie insenerid usaldavad ka selle küsimuse termopaaridest ja termistoridest automaatsete aparaatide hooleks. Terves majas hoitakse temperatuur kogu aeg vajalikul kõrgusel nagu kvartsstabilisaatori kambriski.

Sellise küttesüsteemi eelised on väga suured. Vähe sellest, et ta on lihtne ja hügieeniline (puuduvad kolled, katlad, süsi ja šlakk), ta võib töötada ka aasta läbi: talvel kütab hoonet, suvel tekitab aga tubades meeldivat jahedust. Seejuures on süsteem erakordselt ökonoomne. Näiteks kulutab ta õhu soojendamiseks kahekümne kraadini neli kuni viis korda vähem energiat kui tänapäeva parimad küttesüsteemid.

Kuidas seda seletada?

Selgub, et ruum ei soojene mitte üksnes elektrivoolu arvel, vaid osa soojust ammutatakse väljast, tänavalt.

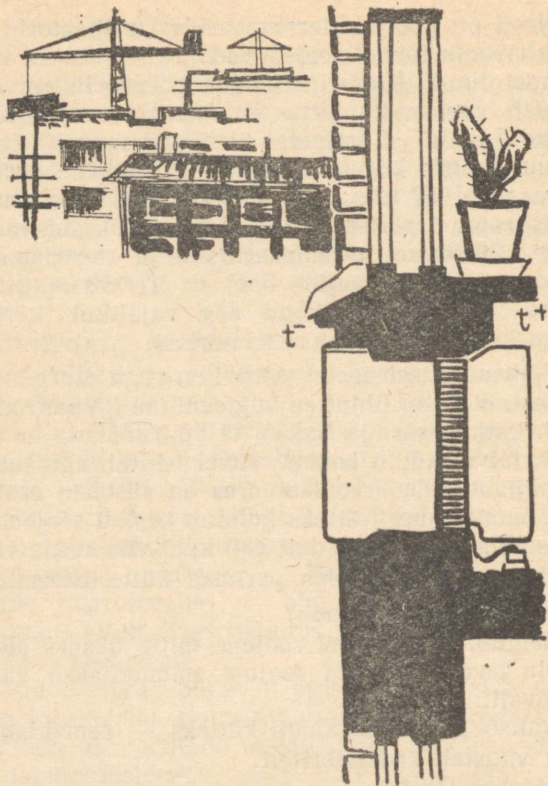
Välisõhk on siin samuti kütteks — eemaldab soojust välistelt radiaatoritelt.

Mõelge järele!

Iidsest ajast peale on arvatud, et soojendada võib ainult mingi kuum keha: tuli, päike. Selgus aga, et pooljuht-termopatareides suudavad tekitada soojust pakane ja elektrivool.

Valitsedes pooljuhte, oskame me kasu saada isegi talvisest pakasest!

Seade, millest te selles peatükis lugesite, pole oma olemuselt uus.



Niisugusena võib välja näha tuleviku majades pooljuhtidest kütte- ja jahutussüsteem.

Juba ammu on olemas niisuguseid masinaid, mis muudavad elektrivoolu soojuseks, samuti on meil külmutuskapid ja kunstliku kliima seadmed.

Kõigil neil tehnilistel seadmetel on üks ühine iseärasus — nendes töötavad tingimata mingid meh-

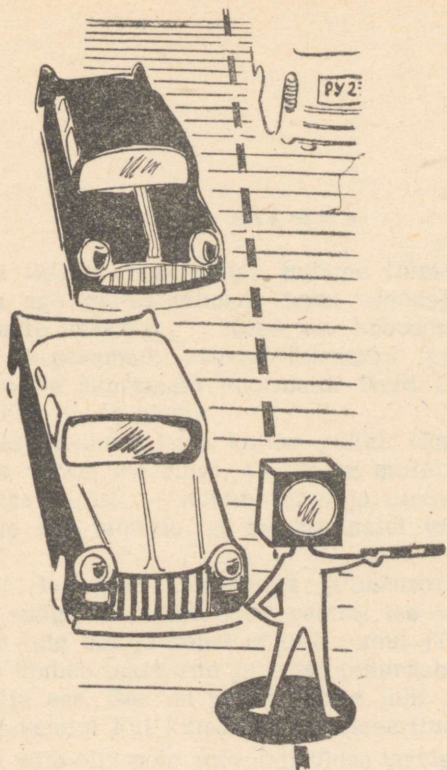
hanismid: pöörlevad mootorite völldid, liiguvad pum-
pade kolvid ja transmissioonid. Aga iga mehhaani-
lise liikumisega kaasneb hõõrdumine ja detailide
kulumine, mis omakorda põhjustab energiakadusid.
Mehhanismide eest tuleb hoolitseda, neid peab
remontima ja vahetama kulunud osi. Ei ole ime, et
tänapäeva tehnika püüab igal pool, kus see on või-
malik, vabaneda liikuvatest mehhanismidest.

Mitmesugustes tööstusharudes juurutatakse praegu
protsesse, mida Nõukogude Liidu Teaduste Akadee-
mia president A. N. Nesmejanov tabavalt nimetas
«mehhanismituteks». Selle uue progressiivse teh-
nika kõige eredamateks näideteks võib tuua niisugu-
seid pooljuhtseadmeid, nagu termoelektrigeneraato-
rid, elektrokülmutuskapid ja nende kõikvõimalikud
kombinatsioonid. Vaieldamatult on need meie töös-
tuse homse päeva ettekuulutajad.

Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page.



Faint, illegible text at the bottom of the page, likely bleed-through from the reverse side.



MASINAD, MIS NÄEVAD

AUTO SILMAD

Juba iidsest ajast töötab hobune inimese heaks. Hiljem aga ehitas inimene tema asendajaks masinaid: auto, traktori... Need on hobusest kümned korrad tugevamad: veavad kiiremini ja võtavad peale palju suuremaid koormaid. Kuid hobusel on suur eelis — ta näeb.

Vanas Moskvast istus kutsar pukki, tõmbas ohjast ja vahtis ise ringi, tundmata muret sihtkohta jõudmise pärast — hobune nägi ja tundis teed. Ja inimene tuli mõttele, et ka masinatel võiksid olla silmad.

Ühes teaduslik-fantastilises jutustuses kirjeldatakse «nägijat» autot. See peatub ise valgusfoori punase tule ees ja rohelise tule puhul jätkab teed, sõidab ümber takistuste ja isegi pidurdab ettejäeva jalakäija ees. See on masin, mille juht ei tunneks end halvemini kui kutsar hästidresseeritud hobusel!

Aga võib-olla pole autojuhti üldse tarvis. Sellesamas jutustuses sooritas «nägija» auto iseseisvalt pika teekonna.

Selles fantaasias pole midagi teostamatut. Juba ammu tuntakse fotoelemente — masinate «elektron-silmi». Pooljuhtide rakendamisega muutusid need hämmastavalt lihtsateks ja odavateks.

Elektrilise nägemise idee tekkis juba möödunud sajandil. Kõigepealt sai tehnika füüsikutelt niinime-

tatud vaakuumfotoelemendid. Aluse nende valmistamisele pani silmapaistev vene teadlane A. G. Stoletovtov.

VALGUSEGA TULISTAMINE

Palju vaeva nägid õpetlased, et mõista kõige lihtsama nähtuse saladust looduses — valgust. Alles poolsada aastat tagasi õnnestus seda avastada.

Valgusel avastati kaheksugune loomus.

Tungimata üksikasjaliselt keerulisse füüsikalisse olemusse, näitame ainult, et ühelt poolt on valgus elektromagnetilise välja laineline liikumine (see on sama mis raadiolained, ainult lainepikkus on palju väiksem). Teisest küljest on valgus osakeste, footonite voog. Tuleb välja, et valgustades mingit eset, me nagu «tulistame» teda omapäraste elektromagnetiliste võnkumiste «kuulidega».

Mis juhtub, kui niisugune valguse «kuul» langeb metalli- või pooljuhipinnale? Ta võib ära anda oma energia aine elektronidele. Seejuures saavad mõned neist nii tugeva tõuke, et lendavad ainest välja ümbritsevasse ruumi.

Kujutage endale ette lihtsat aparati. Õhutühja klaasballooni on joodetud kaks metallplaadikest, mis on traadiga ühendatud elektripatareiga.

Saadame valguskiire katoodile — plaadile, mis on ühendatud vooluallika negatiivse poolusega. Katoodist hakkavad välja lendama elektronid. Niipea kui nad lahkuvad metallist, haarab neid elektriväli ja kannab positiivselt laetud plaadile — anoodile. Nii kaua kui katood on valgustatud, lendavad elektronid läbi riista. Valguskiir tekitas elektrivoolu.

Kirjeldatud aparaat ei ole midagi muud kui lihtsaim vaakuumfotoelement.

Vaakuumfotoelemendil on oluline iseärasus — ta tegutseb erakordselt kiiresti. «Klaassilm» vastab valguskiirele silmapilkse elektrivoolu tõukega. See pärast rakendatakse seda aparaati seal, kus on vaja sagedasi valgusesähvatusi muuta elektrilisteks võngeteks.

Näiteks jooksevad helikino aparaadist püüdmatult kiiresti läbi «heli tee» triibud. Fotoelement muudab nende vilksatused vooluimpulssideks ja valjuhääldajatest kostab muusika.

Televiisori ekraanil tantsib baleriin. Teda vaadates kasutate te samuti «klaassilma» teeneid. Studios on artisti ette asetatud ülekandetoru — omapärane vaakuumfotoelement. Igas sekundis tekivad temas miljonid elektrilised impulsid, millega jäädvustataksegi kujutis.

Niisiis, vaakuumfotoelement on väga kiire toimega, kuid see-eest nõrga nägemisega. Tema tundlikkus valguse suhtes ei rahulda kaasaegset tehnikat. «Klaassilmale» peab tahes-tahtmata juurde lisama lampvõimendajad, mis teevad ta kallimaks ja piiravad praktilist kasutamist.

Leiutajad, soovides tõsta aparaadi tundlikkust, leidsid palju teravmeelset. Fotoelemendi katood kaeti spetsiaalsete ainetega, balloon täideti gaasiga, mõeldi välja kavalad elektronide arvu kordistajad.

Hoolimata sellest ei muutunud «klaassilm» küllalt tundlikuks valguse suhtes. Kuid mitte üksnes selles ei näinud insenerid aparaadi puudusi. Nagu iga klaas oli ka «klaassilm» habras, võrdlemisi lühiealine ja ebaökoonoomne. Õrn klaasriist ei talunud masinale asetamist, mürisevate võllide ja hammasrataste lähedust. Raske oli teda kohandada tööks tehase tsehhis.

«Klaassilma» täiustamisega nähti palju vaeva, kuid otsustavat edu ei õnnestunud saavutada.

Seejuures oli juba kaheksakümmend aastat tagasi avastatud nähtus, mis aitas kujunenud olukorrast välja pääseda.

UNUSTATUD AVASTUS

Inglise füüsik Willowbay Smith otsis ühe oma töö jaoks suure elektrilise takistusega materjale. Ta katsetas paljusid materjale ja lõpuks jäi peatuma pooljuhist pulgakesel — seleenil.

Smith lülitas seleenpulgakese oma elektrilisse skeemi. Mõne aja möödudes juhtus midagi arusaamatut: ootamatult kasvas vool ahelas väga järsult. Õpetlane kontrollis, kas kusagil ei ole lühiühendust. Kõik oli korras. Ja järsku ta märkas, et aknast langes seleenpulgakesele kuldse täpina päikesevalgus. Kas tõesti just selle tõttu muutus nii palju elektrijuhtivus? Smith varjas kiire käega — ja vool vähenes. Süüdlane oli leitud!

Teadlane teatas oma avastusest kolleegidele ja varsti valmis esimene seleenfototakisti. Ideaalselt lihtne aparaat — väike tükike pooljuhti — osutus valguse suhtes kümned korrad tundlikumaks kui inimese silm.

Nii nagu tihti pooljuhtide füüsikas, ei äratanud ka fototakisti avastamine alguses huvi. Ta unustati kiiresti ja meenutati alles poole sajandi pärast, kui avastati uuesti seleeni suurepärase omadus «tunda» valgust.

MATERJALID, MIS NÄEVAD

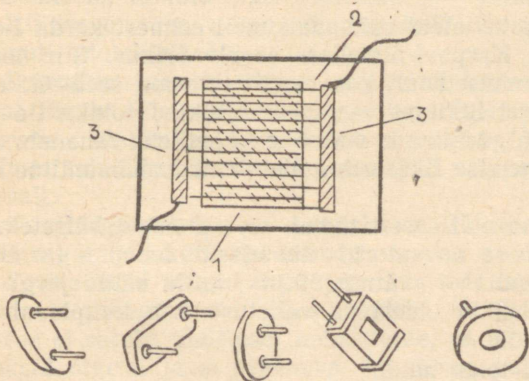
Viimase kümne aasta jooksul leidsid uurijad palju pooljuhte, millel on suuremal või vähemal määral seleeni suurepäraseid omadusi.

Õnnestus üksikasjaliselt välja selgitada ka pooljuhi ja valguse vastastikune mõju. Kõik toimub siin palju lihtsamini kui vaakuumfotoelemendi balloonis.

Rida «valguse kuule» tungib pooljuhti. Seal kuluvad fotonid oma energia elektronide vabastamiseks aatomite vangistusest ja tekivad augud.

Vabaduse saanud volukandjad ei lenda ainest välja, nagu see toimub vaakuumfotoelemendis, vaid neid haarab elektriväli otse pooljuhi sügavuses.

Praegu on erinevatest materjalidest valmistatud palju fototakisteid. Nende kuju ja ehitus oleneb sellest, milleks nad on määratud. Tõsi, oma töötamise



Üleval — skeem seleenifototakisti konstruktsiooni kohta: 1 — seleen; 2 — õnarused klaasil; 3 — elektroodid. All — kodumaa tööstuse poolt toodetud fototakisteid.

kiiruse poolest jäävad fototakistid vaakuumfotoelementidest maha ja mõnikord kaasnevad temperatuuri muutustega ka uued omadused. Kuid kõiki neid on kerge valmistada, nad on töökindlad, pikaealised ja odavad. Peamine on aga see, et need «kivisilmad» on tuhat korda tundlikumad «klaassilmadest».

On fototakisteid, mis nii nagu termistoridki püüavad infrapunaseid kiiri (isegi neid, mida kiirgab inimene). Teised registreerivad ultravioletset, röntgeni- ja radioaktiivset gammakiirgust. Ja seepärast pole vaja imestada, et need vähenõudlikud aparaadid panid aluse automaatika tormilisele arengule.

Suuri teeneid on fototakistite ehitamisel ja juurutamisel meie maal pooljuhtide füüsika väsimatul entusiastil Leningradi teadlasel B. T. Kolomitsil.

TEHASTE TSEHHIDES

Fototakisteid rakendati meil esimest korda Leningradi Karpovi-nimelises seebivabrikus. Siin loevad nad kohusetruult konveierilt tulevaid seebitükke.

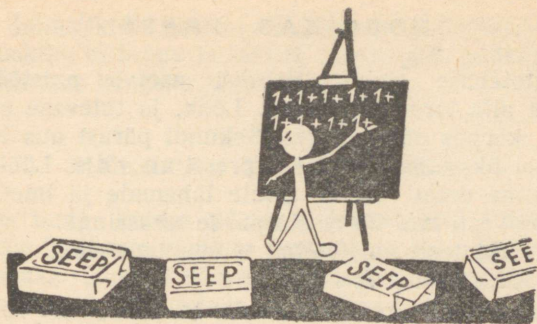
Edasi liikudes varjab seebitükk fototakistile juhitud valguskiire ja vool ahelas hetkeks väheneb. Selle vähenemise fikseerib kohe elektromehhaaniline loendaja.

Juba neli aastat töötab see automaat häireteta.

Tehase novaatorid ühendasid loendajaga erilise aparadi — «rütmimõõtja», mille näidu järgi võib igal hetkel otsustada vahetuse- või kuuplaani täitmise üle.

Või teine näide.

Mööda renni veerevad laagrite lihvitud kuulid. Kõik nad ei ole ühesugused. Ühed neist on hästi töödeldud, läikivad, eredad nagu elavhõbedatilgad. Kuid on ka läiketuid, mida pole piisavalt lihvitud.



Kuulid veerevad kiiresti teeristini. Siin jaguneb renn kaheks, teeristile on asetatud värav. Nagu nõiakepi väel avab värav tee kord vasakule, kord paremale. Kõik läikivad kuulid lähevad paremale, monteerimisele, tuhmid aga vasakule — praagikasti.

Kuidas on see automaat ehitatud? Ta põhineb samuti fototakisti tööol.

Fototakisti seisab värava ees renni kõrval. Aparaat jõuab «üle vaadata» iga kuulikese ja anda väravale elektrilise käsu, kumb tee avada. Läikivaltelt ja tuhmidelt kuulidelt peegeldub valgus ju erinevalt.

Kuullaagrite tehastes asendab see lihtne mehhaaniline kontroll kümneid inimesi.

Fototakistid aitasid trükkida ka seda raamatut, mida te praegu loete. Nad jälgisid, et trükimasinasse ei satuks üleliigset paberilehte, et lehed paikneksid õigesti ja ei rebeneks. Iga häire puhul peatasid fototakistid otsekohe trükimasina.

Autotehase tsehh. Kiiresti asetab naistöoline pressi alla terasest tooriku. Löök, ja tulevase esilaterna korpus ongi valmis. Sekundi pärast uus löök, ja veel üks latern võetakse pressi alt välja. Löök, ja järgmine detail... Te astute lähemale ja imetlete, kui osavasti muljub masin pakse terasringe.

Ja äkki teeb naistöoline teile ettepaneku:

«Pistke käsi pressi allal!»

Mis see siis on? Kas kuulsite te valesti või on inimene kaotanud mõistuse? Ei, ta naeratab:

«Noh, kardate proovida?»

«Mida siin proovida! Ta ju purustab käe, mitte midagi ei jää järele!»

«Kuid mina teen proovi!»

Te ei jõua veel toibuda, kui ta on pistnud käe pressi alla... ja see ohtlik metallimürakas peatub pidurite kriiksudes.

«Ohutustehnika,» selgitab naistöötaja uhkelt.

Kui te küsite, miks käsi terveks jäi, jutustab ta teile palju huvitavat.

Kui palju on insenerid vaeva näinud, selleks et pressidel töötamine muutuks ohutuks! Masina siselülilimiseks valmistati näiteks mitte üks, vaid kaks nuppu, et töölise mõlemad käed oleksid tegevuses. Mõeldi välja ka niisugune asi: kui press langeb, liigub tema ees liist, mis eemaldab hädaohtlikku kohta sattunud käed. Prooviti isegi töölise käsi siduda peene ketiga nii, et igakord, kui press langes, tõsteti käed keti abil üles. Pole raske ette kujutada, kui ebamugavad olid niisugused vahendid, kuidas nad tüütasid inimesi ja segasid tööd.

Kuid see press on nägija. Ta töötab ja samal ajal ka jälgib, et inimene ei jääks pressi vahele. Satub

käsi juhuslikult pressi alla, lambist fototakistisse valguskiirt ei lange ja takisti annab käsu piduritele. Töö muutus kergeks ja ohutuks.

VALGUSE TEATEJOOKS

Kas teate, kuidas peetakse hundijahti? Võetakse punaste lipukeste vanik ja riputatakse puudele ümber metsatuka. Hundid näevad lipukesti, mille ebaharilik välimus neid hirmutab ja nad jooksevad tagasi. Kuid ühes kohas lipukeste ahelas on jäetud vahe. Hundid jooksevad sinna ja satuvad peidus oleva jahimehe kuulide ette.

Moskva tehase «Prožektor» ühes tsehhis oli varem samuti niisugune vanik. Mispärast?

Kujutlege, et katsetatakse prožektorit. Kõrgepingeseade asub otse tsehhis. Kui vool on sisse lülitatud, ei tohi minna seadme ligidale, sest pinge on surmav — kolm tuhat volti. Selleks et tagada inimeste julgeolekut, piirati seade lipukeste vanikuga. See oli leppesignaal — ära mine keelatud tsooni.

Ainult erinevalt hundist ei karda inimene lippe. Juhtus, et lukksepp vajas kruvikeerajat vaniku taga asuvalt lauvalt. Ta riskeeris ja läks ohtlikku tsooni. Niisuguseid juhuseid esines tihti. Katsetajad pidid teravalt jälgima ümbritsevaid inimesi ja olema iga hetk valmis õigeaegselt voolu välja lülisma.

Praegu me ei näe tsehhides enam mingeid lipukesti ja katsetajatel pole tarvis närveerida. Nad panid valvesse fototakisti.

Läätse poolt kitsaks kiireks koondatud väikese lambikese valgus antakse mitme peegli abil edasi ümber keelatud tsooni ja ta satub lõpuks «kristallsilma». Kui keegi läheb hädaohtlikku kohta, katkestab ta paratamatult valguskiire ja fototakistit läbib

vool nõrgeneb järsult. Tulemusena lülitub kõrgepinge otsekohe välja.

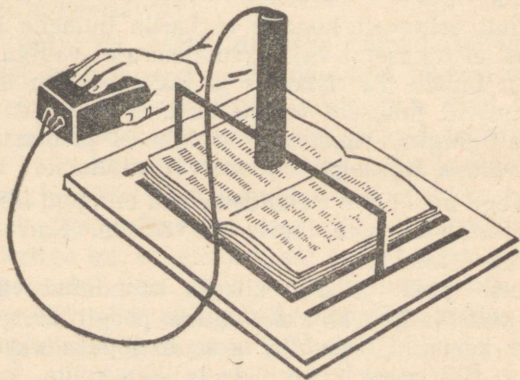
Praegu on sadu niisuguseid nägijaid — automaatseid päästjaid.

MASINAD, MIS LOEVAD

Laua taga istub inimene tumedates prillides. Ta on täiesti pime. Kuid tema ees on harilik raamat, samasugune nagu see, mis on praegu teie ees. Ja pime loeb seda raamatut.

Me teame, et inimesed, kes on kaotanud nägemise, loevad sõrmedega kobades. Pimedatele määratud raamatutes kujundatakse tähed, numbrid ja kirjavahemärgid kõrgematest punktikestest. Kuid nüüd võivad pimedad lugeda ka igasugust harilikku trükiteksti — raamatut, ajakirja, ajalehte jne.

Raamatu kohal, mis on tumedates prillides inimese ees, liigub tihedalt lehekülje vastas väike metallsilinder. Kõrvale on kinnitatud tahvlike, millel pime



Lugemismasin pimedatele.

hoiab oma kätt. Tema sõrmede all on kuus kõrvuti
ava, millest hüppavad välja metallvarraste otsad.
Silinder liigub piki rida ja vardad muudavad kiiresti
oma asendeid: ühed kaovad, teised ilmuvad nähta-
vale. Selgub, et varraste asetus aukudes vastab täh-
tedele raamatus, mille kohal asub sel hetkel silinder.

Kuidas see saavutatakse?

Kui silinder möödub mingist tähest, valgustab ta
seda ja läbi väikese läätse projekteeritakse tähe
kujutis nagu fotoaparaadiski kuuele tibatillukesele
fototakistile. Sõltuvalt tähtede kontuuridest saavad
fototakistid valgust erinevas järjekorras ja seetõttu
neid läbiv vool muutub. Iga fototakistiga on läbi
relee ühendatud elektromagnet, mis paneb liikuma
jõhe varrastest. Puudutades sõrmedega vardaid, loeb
pime raamatut. Aparaat nagu tõlgiks raamatu keelde,
mis on arusaadav pimedale inimesele.

Et selle seadme abil lugema õppida, kulub pimedal
ainult mõni tund. Pole raske ette kujutada, missu-
guse vaimustusega võtsid pimedad inimesed vastu
selle suurepärase «lugeva masina».

On konstrueeritud ka teist tüüpi aparaat, mis
loeb. Selles on fototakistid ühendatud heligeneraa-
toritega, mis annavad erineva kõrgusega helisid.
Tähtede kohal liigub lugeja silindriline pea. Valguse
tee fototakistiteni tõkestatakse erinevates kombinat-
sioonides ja seega lülitatakse sisse ka erinevad gene-
raatorid. Valjuhääldajast kuulete midagi niisugust,
mis meenutab kiiresti vahelduvaid lihtsaid muusika-
akorde.

Pime õpib kiiresti selgeks «laulvate tähtede» hää-
led ja nende iseärasused. Aparaat nagu loeks talle
ette.

Võib lõputult tuua näiteid fototakistite rakendus-
aladest. Nende kasutamine laieneb iga kuuga. Ja

nendes lihtsates riistades kasutatakse teist pooljuhtide iseärasust — nende valgustundlikkust.

Muuseas, kas ainult fototakisteid võib valmistada selle omaduse põhjal?

Meenutagem pooljuhtide tundlikkust soojuse suhtes. Kõige lihtsamal kujul andis see tehnikale termistorid. Niipea aga kui õpetlased hakkasid kombineerima elektroonse ja aukjuhtivusega pooljuhte, viis see omadus teiste tähtsate seadmete — termoelementide — loomisele.

Mis siis, kui proovida samasugust teed ka pooljuhtide valgustundlikkuse praktilisel kasutamisel? Kas ei aitaks see veelgi täiustada masinate ja aparaatide «nägemist»?



APARAADID, MIS NÄEVAD

SUUREPÄRANE PEEGLIKE

Väike terasketas kaeti seleenikihiga, mille paksus oli võrdne žiletitera paksusega. Seeleni pind kaeti väga õhukese ja seepärast ka läbipaistva kulla kihiga. Terase- ja kullakihtidest toodi välja metalljuhtmed. Pealt kaitsti ketas läbipaistva lakiga ja pandi ta suurde ümmarguse aknaga plastmassist kesta. Saadi midagi miniatuurse tuhmi peegli sarnast. See on ventiilfotoelement — uus valgustundlik pooljuhtaparaat. Tal on järgmine iseärasus: kui fototakisti valguse mõjul ainult suurendab väljastpoolt, näiteks patareist saadavat voolu, siis fotoelement ei vaja mingisugust abi. Valgustage teda, ja ta annab ilma igasuguse patareita elektrienergiat, mis suudab galvanomeetri osutit kõrvale kallutada.

Milles on siin asi?

Selgub, et pooljuhikiht on siin nagu kahekordne. Aparaadis valmistamisel oli lähtematerjaliks aukjuhtivusega seleen, millest koosnebki kihi alumine osa. Kuid pealt, kulla kihist, tungisid aatomid üle pooljuhti ja see muutis seleeni aukjuhtivuse elektronjuhtivuseks. Aparaadis liitusid kaks erisugust pooljuhikihti. Mis tähtsus sel on?

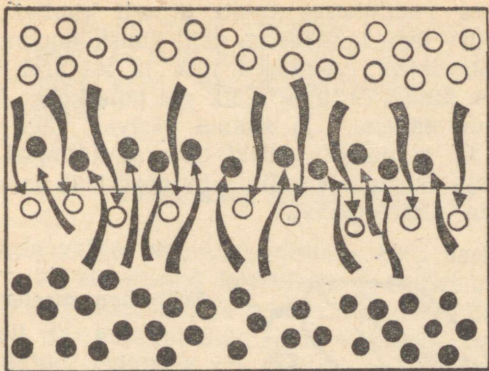
Proovime selgitada, mis toimub elektron- ja aukjuhtivusega pooljuhtide kokkupuutekohas.

Oletame, et me asetäime elektronjuhtivusega seleenplaadi aukjuhtivusega seleenplaadi peale. Niipea kui plaadid liitusid, hakkasid elektronid elektronjuhtivusega seleenist üle minema aukjuhtivusega seleenplaadi piirkonda. Kuid suurem osa neist ei suuda piiri ületada. Miks? Sellepärast, et esimesed ületunud elektronid, mis kogunesid aukjuhtivusega plaati, muutusid nagu valvuriteks. Oma negatiivsete laengutega tõukavad nad tagasi kõik teised elektronid, mis püüavad tungida sellesse piirkonda. Samal ajal rändavad aukjuhtivuse tsoonist ära ka augud, asudes samuti piirivalvele, ainult teisele poole, ja ei lase sellest läbi auke aukjuhtivusega piirkonnast. Nii moodustub piiril tõkkekiht.

Ka meie suurepärasest peeglis — ventiilfotoelemendis — eraldab tõkkekiht elektronjuhtivusega seeleni aukjuhtivusega seleenist.

Juhime valguskiire fotoelemendile. Pooljuhi elektronjuhtivusega piirkonnas vabastab valguskiir uusi elektrone. Need visklevad, tõuklevad ja, mitte mahutades õhukesse elektronjuhtivusega seelenikihti, lähevad üle kullakihti, sest teist teed neil ei ole — aukjuhtivusega piirkonda suleb tee tõkkekiht. Tulemusena tekib kullakihi elektronide ülejääk, see tähendab, negatiivne elektrilaeng.

Valgustamise ajal tekib pooljuhi elektronjuhtivusega piirkonnas mõnel määral ka mittepõhilisi voolukandjaid — auke (need tekivad igale poole, kus elektronid lahkuvad pooljuhi aatomitest). Aukude jaoks pole piirikiht mingiks takistuseks, sest nad käituvad nagu positiivselt laetud osakesed. Positiivne laeng on kui luba pääsuks üle piiri. Elektro-



Suletud kihi tekkimine elektron- ja aukjuhtivusega pooljuhi piiril.

nidest «piirivalvurid» lasevad auke vabalt läbi suletud kihi seleeni aukjuhtivusega piirkonda. Seal tekib positiivse laengu ülejääk, mis koguneb teras-kettale.

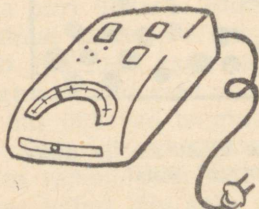
Niisiis on kullast kilel negatiivne ja terasalusel positiivne poolus. Ühendame need juhtmete abil galvanomeetriga. Seni kuni pooljuhti valgustatakse, on ahelas vool ja galvanomeetri osuti kaldub kõrvale. Niisugune on ventiilfotoelementide töötamise printsiip.

AUTOMAATNE LABORANT

Igaüks on pidanud verd andma meditsiinilisteks uurimisteks. Kuid kas kõik teavad, kui palju tööd kulub niisugusteks analüüsideks!

Vereliblekesi — erütrotsüüte — loeb laborant üle mikroskoobi all.

Mitmes ruudukeses tuleb täpselt kindlaks teha libledede arv (aga igaühes on neid kuuskümmend kuni seitsekümmend), tulemused liita ja seejärel korrutada ühe kindla arvuga. Kõik see pole kerge. Tuleb pingutada nägemist ja silmad väsivad väga ruttu. Kuidas ka ei püüaks, siiski tehakse küllaltki suuri vigu: saja tuhande verelible hulgast jääb mõnikord lugemata kümme tuhat.



Erütrohemomeeter.

Nüüd on selliste analüüside tegemiseks koostatud nägev automaatne aparaat — erütrohemomeeter. Inimeste silmade asemel töötab aparaadis seleenfotoelement.

Oma välimuselt ja mõõtmetelt meenutab aparaat portatiivse kirjutusmasina kasti. Ta sisemusse on paigutatud lambike, kassetid katseklaaside jaoks verrega, valgusfiltrid ja fotoelement, pinnale aga galvanomeeter.

Erilise lahustiga lahjendatud veri valatakse katseklaasi ja asetatakse aparaati. Lambikese valgus, läbides infrapunase valguse filtri, tungib läbi vere ja satub fotoelemendile.

Mida rohkem on vereliblekesi, seda vähem infrapunaseid kiiri satub seleenikihile. Aparadi osuti peatub jaotusel, mis vastab erütrotsüütide arvule mikroskoobi vaateväljas. Erütrohemomeeter teeb ka teist laboratoorset tööd: määrab kindlaks vere värv-

aine — hemoglobiini sisalduse. Analüüside täpsus on tunduvalt suurem ja aega kulub nende teostamiseks mitu korda vähem. Silmiväsitav töö pole enam vajalik.

KIRURGI ABILINE

Haigla valges operatsioonisaalis käib harilik töö. Kirurg on süvenenud keerulisse operatsiooni, tema ümber on assistendid ja meditsiiniõed. Kõik teevad vaikselt ja keskendunult oma vastutusrikast tööd. Pingutatud vaikuses on kuulda rahulikke käske: «skalpell», «pintsett», «käärid», «kontrollige hapnikku»! . . .

«Kontrollige hapnikku» — mida see tähendab?

See on käsk assistendile: tehke kindlaks, kas haige veres on küllaldaselt hapnikku. Narkoosiga uimastatud haige hingab harva, tema rind kerkib vaevalt-märgatavalt. Juhtub, et kopsud ei suuda küllastada verd elustava õhuga. Siis tuleb inimesel kunstlikult hingata tervistavat hapnikku.

Aga kuidas määrata vere hapnikusisaldust?

Harilikult teostatakse keemiline analüüs, see on aga aeganõudev ja töörohke viis. Pidevalt verd jälgida ei ole võimalik.

Kirurgid unistasid juba ammu aparaadist, mis võimaldaks pidevalt kontrollida hapniku hulka veres. Ja praegu on niisugune aparaat — oksühemograaf — nende teenistuses.

Kõrvanibu või kõrva õhukese osa külge kinnitatakse midagi näpitskõrvarõnga taolist. See on aparaadi tundeelement. «Kõrvarõnga» ühesse poolesse on ehitatud valgusfiltriga lambike, teise — miniatuurne seleenfotoelement. Nende vahele on asetatud elav kude veresoontega, mida fotoelement näeb nagu läbi. Kui veres on palju hapnikku, on veri hele ning

seleenile satub lambikesest palju valguskiiri. Seepärast tekib fotoelemendis ka suhteliselt tugev elektrivool. Kuid niipea, kui hapniku hulk väheneb, veri tumeneb ja fotoelemendis tekkinud vool nõrgeneb. Need elektrilised võnked võimendatakse ja nad panevad tööle isekirjutava sule, mis libiseb mööda joonelist paberit. Vajaduse korral antakse hapnikku automaatselt. Kirurg võib rahulikult opereerida.

Ventiilfotoelemente valmistatakse mitte üksnes seleenist. Me teame, et visates ahju vasktraadi, tekib tema pinnale vasehapendi kiht. Vasehapend oligi esimese ventiilfotoelemendi ehitusmaterjaliks. Niisuguseid aparate valmistatakse ka väävelhõbedast. Need on eriti tundlikud nähtamatute infrapunaste kiirte suhtes. Ventiilfotoelemente valmistatakse ka vääveltalliumist, mis on erakordselt kiire reaktsiooniga. Nendega saab asendada hapraid vaakuumfotoelemente kinoprojektorites (heli reprodutseerimisel).

KUUL SÜÜDATUD TULETIKK

Peatükis «Termomeetri asemel» oli juttu pooljuhtbolomeetritest, tundlikest kiirgusenergia vastuvõtjatest. Kasutades termistori asemel erilist ventiilfotoelementi — fotodioodi — on neil aparatuuridel tõepoolest muinasjutuline tundlikkus.

Selle aparadi leiutaja — ameeriklane Joh. Sive kasutas kristallilist pooljuhti germaaniumi. Spetsiaalse töötlemisega saavutatakse selles elektroonse ja aukjuhtivuse piirkonnad, mille vahele tekib tõkkekiht. Fotodiood lülitatakse vooluringi samuti nagu fototakistigi, s. o. järjestikku madalpinge elektripatareiga. Patarei on lülitatud nii, et tema poolt tekitud elektriväli on suunatud tõkkekihi elektrivälja suunas (välja suunda loetakse positiivselt negatiiv-

sele poolusele). Selle välja mõjul elektronide piirivalve nagu tugevneks ja seepärast pimeduses vool läbi aparadi peaaegu täiesti puudub. Kui germaaniumi elektronjuhtivusega piirkonda satub valguskiir, vabastavad footonid elektrone ja auke. Harilikus ventiilfotoelemendis lähevad augud läbi tõkkekihi juhuslikult, aeglaselt. Aga siin haaratakse nad patarei elektrivälja poolt ja nad ületavad piiri kõik koos, mis tekitab ahelas tunduva voolutõuke. Eriti järsult reageerib aparaat infrapunastele kiirtele.

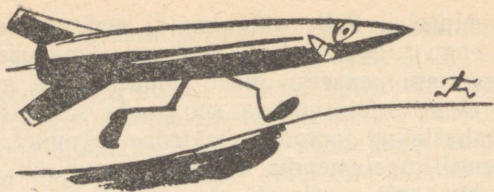
Veel täiuslikum on valgustundlik pooljuhtaparaat, mida nimetatakse fototrioodiks ehk fototransistoriks. See mitte ainult püüab valgusenergiat, andes valgustamisel voolutõuke, vaid kohe ka võimendab elektrilise signaali. Fototriood on omapärane kristalne elektronide kordistaja. Ta nagu ühendab endas fotodioodi ja pooljuhtvõimendaja (neist võimendajatest loete te edaspidi, viimases peatükis).

Toome näiteid, mis iseloomustavad fotodloodide ja fototrioodide tundlikkust. Öösel leitakse lennuk nendega kergemini üles kui raadiolokaatoriga. Nende abil saame koostada salapärase Marsi soojusliku kiirguse kaardi. Kui esimene julge mees maandub Kuul, võib ta signaliseerida sellest Maale lihtsalt tiku süütamisega. Aparaat püüab sähvatusenergia kinni 380 000 kilomeetri kauguselt.

Ajakiri «Rahu kaitseks» kirjutas fototransistoridest järgmist: «Nagu alati, võib seda suurepäraselt avastust kasutada nii loovateks kui ka purustavateks eesmärkideks. Fototransistoridega varustatud raket lendab linnanl, sest teda tõmbab linna soojuslik kiirgus, mida on võimatu maskeerida.

Rakett hakkab jälitama laevu, lennukeid ja kõike elavat.»

Ameerika kindral Arnold jutustas sellest, mida ta



tundis, kui teda jäeti üksinda tuppa ühega niisugustest raketidest, nn. «otsiva peaga» raketiga. Rakett pöördus oma alusel tema poole — teda tõmbasid keha soojusest tekkivad infrapunased kiired. «Loodame,» kirjutas kindral Arnold, «et need koletised ei välju kunagi oma puuridest.»

Pole võimalik mitte nõustuda nende sõnadega. Lisame ainult: parem oleks olnud üldse mitte valmistadagi neid surmatoovaid koletisi, kasutada selleks inimhõistuse suuri võite.

KIIR JUHTME ASEMELE

Fotodiodi ja fototransistori töötamise printsiibist on selge, et need aparaadid reageerivad silmapilkselt valguse muutustele. Rääkimata heli reprodutseerimisest kinos, avab see fakt veel palju teisi ahvatlevaid võimalusi nende kasutamiseks.

Juba ammu loetakse kõige lihtsamaks ja mugavamaks lähisidepidamisvahendiks väliolukorras valgustelegraafi. Abonendid rääkisid omavahel valgussignaalidega: pikk signaal — kriips, lühike signaal — punkt. Side toimus morse tähestiku järgi.

Kuid selgus, et valguskiirte abil on võimalik rääkida mitte üksnes tinglike signaalide abil, vaid otsest häälega, vajaduse korral võib isegi muusikat edasi anda.

Valgustelefoni ehitus on lihtne. Te räägite mikrofon, selles muundub heli elektrivoolu võnkumisteks. Pulseeriv vool juhitakse elektromagnetisse, kus ta paneb kiiresti liikuma väikese terasplaadi. Viimane asetseb risti kitsa valguskiirega ja katkestab kiire mikrofonide impulsside taktis. See opereeriv «kiir» annabki edasi kõne. Vastuvõtja fotoelement (esimes-tes katsetes oli selleks harilik seleenifototakisti) püüab kinni valguse sähvatused ja, muutes need elektrilisteks võnkumisteks, annab edasi telefoni kuuldeklappidesse. Veel mugavam on pidada sidet nähtamatute infrapunaste kiirtega, mis tungivad läbi suitsu ja udu.

Traadita «kiirtelefon» leiutati enne raadioside ilmumist. Nüüd on teda põhjalikult täiustatud ja ta on varustatud pooljuhtseadmetega.

Germaaniummikristallid paistavad silma ühe eriomaduse poolest: nad lasevad läbi infrapunaseid kiiri. Nähtamatu kiir läbib germaaniumplaadi peaaegu takistuseta, umbes nii, nagu harilik valgus läbib klaasi.

Kujutage ette järgmist katset.

Germaaniumist fotodiodid lülitati elektrigeneraatori ahelasse ja samal ajal hakati kontrollima tema läbipaistvust infrapunaste kiirte suhtes. Siit selgus huvitav tõsiasi: pinge muutumisel muutus ka läbipaistvus infrapunastele kiirtele kristalli tõkkekihis. Olenevalt elektrilistest impulssidest diodid kas peab kinni nähtamatud kiired, nõrgendab neid või laseb vabalt läbi. Seda nähtust on kerge seletada juba tuntud tõkkekihi pulseerimisega ja ta ongi uue telefoni aluseks.

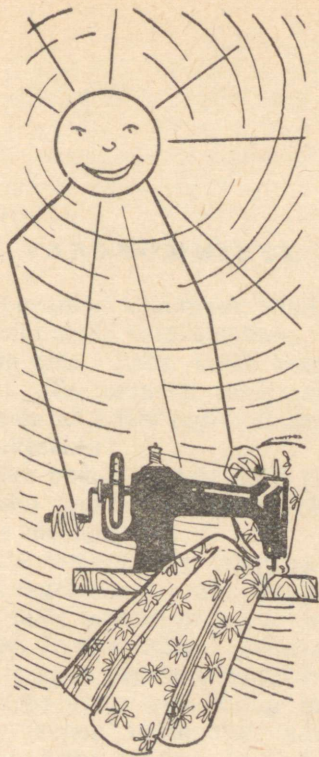
Lambikesest tuleva pideva infrapunase kiire teele asetatakse diodid, milleni tuleb võimendatud mikrofonivool. Kui abonent räägib mikrofon, muudetakse ta hääl võnkumisteks infrapunaseid kiiri läbilaskvas

kristallis. Tulemusena muudab nähtamatu kiir diodi läbides abonendi juures oma tugevust täpselt mikrofonivoolu võnkumiste taktis.

Vastuvõtja fototriood näeb kaugelt edasiandja diodi «silmapilgutusi» ja muudab need elektrilisteks signaalideks, mis peale võimendamist muunduvad uuesti heliks.

Niisuguse ülekande iseloomustavaks jooneks on terav suunatus. Pealtkuulamine pole võimalik, sest selleks, et kõnet kinni püüda, peab katkestama valguskiire, kuid siis ka abonendid ei kuule enam teineteist.

Niisiis, inimene valmistab «nägevaid» aparate, paneb need oma tervist valvama, usaldab nende hoolde töö, mille tagajärjel varem riknes nägemine, asendab nendega isegi oma silmi ja kõrvu. Kuid mõnedel fotoelementidel on niisugused suurepärased omadused, mis puuduvad isegi meie silmal.



KINNIPÜÜTUD KIRED

KIRKPATRICK

VARAHOMMIKUL

Te virgute kevadisel hommikul. Kuid mitte lindude laul ei äratanud teid, vaid süüdlane on teie väike vend. Ta istub oma voodis, vehib kätega ja laliseb rahulolematult. Te tunnete: nüüdsama hakkab ta nutma. Milles on asi? Kes tegi väikesele liiga?

Rõõmus päikesekiir!

Naiivne väike püüab kuldset noolt pihku haarata, kuid see libiseb igakord sõrmede vahelt ära. Kas ei tee see siis meelehärmi!

Teie võiksite vennakesele lohutuseks öelda, et tema vanuses tegelesite ka teie tagajärjetult sellesamaga. Kõik meie lugejad proovisid seda oma varases lapsepõlves. Ja alati libises jonnakas päikesekiir käest, kuidas te ka ei püüdnud teda kätte saada.

Aga väikemehe üritus pole sugugi mõttetud.

Maapinnale langeb uskumatult suures koguses kiirgusenergiat. Kahe ööpäeva jooksul saadab päike meile niisama palju soojust ja valgust, kui põletamisel annaksid kogu maa söe, nafta, gaasi, põlevkivi ja turba varud kokku. Kuid päikeseenergiat ei oska me veel peaaegu sugugi kasutada, sest rõhuv osa tema kiirtest libiseb me käest ära: peegeldub maapinnalt ja kaob maailmaruumi sügavustesse.

Kas tõesti ei täitugi me lapsepõlveunistus? Kas inimesel kunagi ei õnnestu püüda päikesevalgust, hoida teda kinni ja panna tööle?

See on juba õnnestunud! Ja selleks aitasid kaasa
needsamad pooljuhid.

PÄIKESEPATAREI

Kujutlege väikese söögilaua katte suurust kilpi. Sellele on ridadena paigutatud tumedad plaadikesed, mis mõõtmelalt ja vormilt meenutavad rongipileteid. Plaadid on valmistatud laialt levinud pooljuhist — ränist.

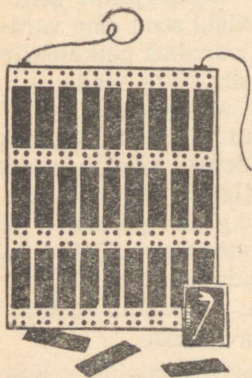
Neid tehti järgmiselt.

Kõigepealt puhastati räni hoolikalt lisanditest. Sulamist saadi suured kristallid, mis lõigati õhukes-
teks neljakandilisteks plaatideks. Iga plaadi ühele pinnale moodustati spetsiaalse töötlemisega inimese juuksekarvast sada korda õhem boorikiht. Töötlemine viidi läbi niisuguse arvestusega, et boori aatomid ei tungiks sügavale pooljuhti. Pealt ja alt kaeti plaadid metallkiledega, millest viidi otsad välja.

Plaadid suleti plastmassist raami, monteeriti kilbile ja ühendati juhtmetega. Saadi ventiilfotoelementide patarei.

Üleval (seal, kus on boorikiht) on ränil aukjuhtivus, all — elektronjuhtivus. Auk- ja elektronjuhtivusega piirkondade vahel tekib tingimata tõekekiht.

Viime patarei heledasse päikesevalgusse ja asetame ta nii, et kiired langeksid talle risti. Nagu oli oodata, annab patarei kohe elektrivoolu. Kuid mis-
sugust! 120 vatti elektriener-



Päikesepatarei.

giat valgustatud pinna ühe ruutmeetri kohta. See pole väike võimsus. Temast jätkub kolmele õmblusmasinale elektrimootorite toiteks.

Et saada niisugust võimsust, tuleks bensiinimootoris näiteks iga kolme tunni jooksul põletada klaasitäis kütust. Aurujõuseadmes põleks sama aja jooksul pool kilogrammi kivisütt. Kuid siin on energia saadud kinnipüüdmatust ja kaalutust päikesevalgusest.

PÄIKESE ENERGEETIKA

Kirjeldatud päikeseplatari muutis elektrienergiaks kuni üksteist protsenti temale langevatest valguskiirtest. Kuid see ei ole piir. On alust oletada, et needsamad ränifotoelemendid võivad kakskümmend kaks protsenti valgusenergiast muuta elektrienergiaks!

On andmeid ventiillfotoelementide kohta, mis on tehtud teisest pooljuhist — kaadiumsulfiidist. Selle elemendi kasutegur on kaheksateist protsenti. Leiutajate arvestuste järgi võib 1,2 meetri laiune, 4,5 meetri pikkune vahvlipaksune plaatfotoelement, mis asub väikese maja katusel, varustada majaelanikke elektrienergiaga kõigiks majapidamistödeks, nagu valgustus, küte, elektripliidid, tolmuimejad, raadiod, televiisorid. Päeval kogub suurepärase pooljuhtelektrijaam energiat, saates voolu hoone elektrivõrku ja akumulaatoritesse, mis on elektrienergia allikateks pimedal ajal.

Praegu uuritakse tervet rida pooljuhte, mis suudavad muuta rohkem valgust elektrienergiaks, kui teeb seda räni. Niisugune on näiteks antimoni ühend alumiiniumiga. Teadlased ootavad kõrget kasutegurit ka antimoni ja indiumi ühendil ehitatud päikeseplatariilt. Need sobivad eriti hästi päikese infrapunase

kiirguse vastuvõtmiseks, sest, nagu teada, moodustab infrapunane kiirgus peaaegu poole päikesekiirguse energiast.

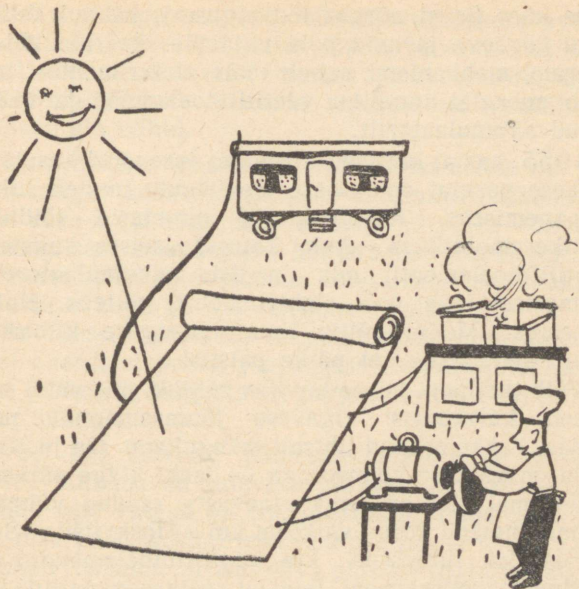
Teoreetiliselt on võimalik ehitada neljakümne kuni viiekümne protsendilise kasuteguriga ventiilfotoelemente.

Missugustel eesmärkidel rakendatakse valgusenergiat tulevikus?

Kõige tõenäolisem on, et esialgu on ta energaetika väikevorm. Päikesepatareid ilmuvad kolhoosidesse, remondi- ja tehnikajaamadesse, geoloogid ja turistid võtavad neid kaasa ekspeditsioonidele, meremehed varustavad nendega oma laevu.

Toome siin ühe kangelase unistuse V. Nemtsovi teaduslik-fantastilises jutustuses «Päikese kild».

«Kujutage ette, Liidia Nikolajevna,» jutustas ta, kinnitades joonestuslauale paberilehe ja joonistades sellele midagi jämeda sinise pliiatsiga. «Siin on vagun, traktoristide elamu. Te olete kindlasti niisuguseid näinud? Traktoristid tõid endaga kaasa suure rulli spetsiaalselt töödeldud kangast või linti, millele on trükitud fotoenergeetilised rakud kõigi vajalike ühendustega. Rull keritakse lahti otse maapinnale ja välielektrijaam on töökorras. Ta laeb akumulaatoreid, toidab raadiojaama, elektriaparatuuri, sõnaga — kõike, mida soovite. Niisugust kangast võib laiali laotada metsavahi onni, kõrgmäestiku observatooriumi või talvitajate juures Arktikas — kuhu aga soovite. Sellest kangast võib ömmelda telke. Seal ongi ta kokkurullituna alpinisti seljal... Kas te mõistate, mida see tähendab, kui meil oleks miljoneid meetreid fotoenergeetilist kangast! Kauplustes hakatakse teda lõikama kääridega nagu lihtsat vahariiet. Otsite teda kümme meetrit ja teil on isiklik elektrijaam ilma igasuguste bensiinimootorite ja generaatoriteta. Kas pole see ime?»



PÄIKESEKIIR TÖÖTAB

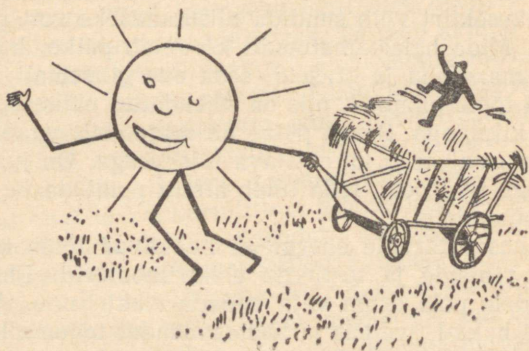
Päikesekiirt võib sundida niisutamiseks vett pum-pama. Mida halastamatumalt kõrvetab päike, kuiva-tades maapinda ja oraseid, seda energilisemalt hak-kavad tööle pumbad, mis on ühendatud päikesepata-reide kilpidega. Seega päike nii soojendab maapinda kui varustab teda ka elustava niiskusega. On ju vett peaaegu igal pool, teda tuleb ainult pumbata ja juh-tida põldudele.

Päikesepatareide energiaga hakkavad tööle kraa-nade, vintside ja tõstukite elektrimootorid. Ehitus-platsidele pole enam vaja vedada elektriliine. Alles hiljuti hakati Šveitsis ja teistes maades tegema laua-kelli, mida keerab üles valgus. Olles mõni tund val-

guse käes (isegi nõrgas toavalguses), käivad kellad mitu ööpäeva ja neid pole vaja üles keerata. Üleskeeramismehhanismi paneb tööle elektrimootor, mis saab energiat tundliku ventiilfotoelemendiga ühendatud akumulaatorilt.

1955. aastal katsusid ameerika insenerid kasutada päikeseenergiat omapärase elektriauto mudeli liikumapanemiseks. Konstruktorid nimetasid sõidukit «päikesemobiiliks». Auto katusel asetses kaksteist ventiilfotoelementi, mis laadisid akumulaatoreid. Viimastest läks vool elektrimootori toiteks. Katse õnnestus. Mudel sõitis ilma igasuguse kütuseta, ainult sellepärast, et päike paistis!

Võib tunduda, et see huvitav sõiduk, mis veidi sarnaneb kurikuulsa «igavese jõumasinaga», pole midagi rohkemat kui lihtsalt mängukann. On ju õige, et ta on väikese võimsusega — isegi kõige päikeseküllasemal ajal on tema «taevast» saadud võimsus kolmkümmend korda väiksem kui «Moskvitšil». See pärast ka tulevikus, kui ventiilfotoelemendid on jõudnud täiuslikkuseni, leiavad «päikesemobiilid» kui transpordivahendid vaevalt täisväärtuslikku kasutamist. Harilike autodega nad konkureerida ei suuda.



Kuid päikesepatarei võib olla suurepäraseks avarienergiaallikaks. Kui autos lõpeb bensiin, siis bensiinjaamani «veavad» masina päikesekiired, mida püüavad sõiduki katusele monteeritud ventiiifotoelementide kilbid.

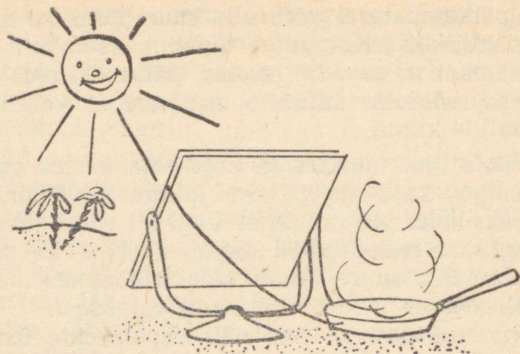
Kolhoosides, tehastes ja raudteejaamades on päikest mugav kasutada väikeste koormate vedamiseks, sest kaks-kolm hobujõudu ei olegi nii väike võimsus. Pealegi saab seisuaegadel koguda energiat akumulaatoritesse. See suurepärane «elektrihobune» hakkab tulevikus kogu päeva «toituma» valgusest.

Arvutused näitavad, et päikesepatareide toodetavast energiast piisab jõepargase liikumapanemiseks, sest päikesest valgustatud pargase katusel on küllalt suur pindala.

Veel üks huvitav päikesefotoelementide kasutamise võimalus on tuleviku planeetidevahelistel laevadel, sest valgus on energiaallikas, mida pole tarvis maa pealt kosmiliseks lennuks kaasa võtta. Laev hakkab lendama mitteloojuva päikese tugevas valgusvoos. Kui varustame raketi fotoelementidega, mille kasutegur kokku on kõigest 10%, siis kümne ruutmeetri suuruselt valgustatud pinnalt koguvad aparaadid kolme kuu jooksul nii palju energiat, kui võiks anda tonn Maa pealt kaasavõetud kütust. Aga selleks, et anda sellele tonnile kosmiline kiirus, peab omakorda põletama veel mitukümmend tonni kütust.

Pooljuhtide poolt püütud päikesevalgus vähendab rakettide kaalu.

Aga kui ahvatlev oleks katta päikesepatareide kilpidega kas või osa kõrbede, kuivsteppide ja teiste põllumajandusele kõlbmatute maade pinnast! Kattes näiteks lõunas asuva kõrbe pinna kas või 3—4 ruutkilomeetri ulatuses fotoelementide plaatidega, võib saada peaagu niisama palju energiat, kui annab kuulus Kuibõševi hüdroelektrijaam! Kuid kõrbes ootab



elektrienergiaks muundamist mitte üksnes valgus, vaid valgusfotoelementide alla paigutatud termopatareid ja infrapunased fotoelemendid muundaksid elektrienergiaks ka veel suure osa päikese soojusest.

Võib-olla mõne aasta pärast, kui teaduse edusammud pooljuhtide vallas leiavad rakendamist ka tööstuses ja kui päikeseplatatareid saab valmistada lihtsalt ja odavalt, võib-olla siis katavad inimesed fotoelementide kilpidega ja termogeneraatorite blokkidega mägede nõlva, majade ja tehaste katuseid ja seinu. Viljatutes kõrbedes, nii kaugele kui silm ulatub, laiuvad soojuse- ja valgusepüüdjate read. Elektrienergiaks muudetud päikesekiirtega pumpab inimene vett, paneb liikuma elektrironge ja sunnib tööle masinad tehastes.

PÄIKESEKIIR JA PUULEHT

Iga kütus on tekkinud kas praegusaegsest või sadakond miljonit aastat tagasi surnud taimeriigist.

Aga millest koosnevad taimed? Maast, veest ja õhust.

Tõepoolest, loodus kasutab ainult neld materjale oma roheluse loomiseks.

Aga materjalist üksi on vähe eseme loomiseks. Maja ehitamiseks ei piisa ainult raua, tsemendi ja telliste viimisest ehitusplatsile, vaid on vaja veel palju tööd, et mõeldu saaks teoks. Aga töötada, see tähendab kulutada energiat. Ehitusplatsil paneb elektrienergia liikuma betoonisegajaid, kraanasid ja tõstukite vintse. Aga taim? Kust ammutab tema energiat? Missugune jõud põhjustab temas aatomite ja molekulide ühinemise?

Selle energia saavad taimed siis, kui nad neelavad oma roheliste lehtedega päikesevalgust. Kui pole valgust, siis taim hakkub. Elava lehe rakkudes kutsub valgus esile tähtsa protsessi — fotosünteesi, mis on igasuguse elu allikaks Maal.

Valgusenergia, mida neelab elav roheline leht, konserveeritakse taimes. Ja iga orgaanilist ainet, ükskõik missuguses vormis, olgu see õun või nisutera, puuvirn või heinasaad, söepank või turbabrikett, võime me õigusega nimetada päikese kiirgusenergia kontsentraadiks.

Kui süsi põleb, vabaneb päikeseenergia, mida kunagi neelasid iidsed sõnajalad.

Kuid taimestik kasutab ainult tibatillukese osa valgusest — vähem kui ühe protsendi. Seepärast kulubki niipalju aega metsa kasvamiseks ja ka maast kaevandatava kütuse varud on nii kasiinad.

PÄIKESE UUED ANNID

Aga kas ei saaks luua orgaanilist toorainet ka ilma taimedeta? Kas poleks võimalik, vältides taimi, valmistada kütust, plastmasse, suhkrut otse õhust, veest ja mineraalsetest ainetest?

Kirjanik A. Kuprin fantaseeris jutustuses «Vedel päike», kuidas «lihtsatest elementidest, mis moodustavad õhu, saab valmistada maitsvaid ja toitvaid, peaaegu tasuta toite».

Juba ammu erutas teadlasi probleem, kuidas kunstlikult läbi viia fotosünteesile sarnast protsessi, mis oleks tunduvalt efektiivsem ja mille tulemusena saaks orgaanilist toorainet sada korda kiiremini, kui see toimub looduses loomuliku fotosünteesi protsessis.

Muidugi, seda julget mõtet ei saa rakendada järsku ellu, sest alguses tuleb kuni peensusteni uurida valguse ja orgaaniliste ühendite vastastikust toimet. Siin on oluline teada, et paljud orgaanilistest ühenditest on pooljuhid ja valguskiir kutsub neis esile elektroonsed protsessid.

Selles suunas töötatakse ja juba on olemas ka esimesi tulemusi. Leningradi teadlane, akadeemik A. N. Terenin jutustas ühel pooljuhtide-alasel teaduslikul konverentsil orgaaniliste värvide fotoelektronika uurimuste tulemustest. Valgustades näiteks kõva värvikihti või värvitud pulbrilist pooljuhti, õnnestus esile kutsuda valgusenergia muundumisi, mis sarnanesid ventiilfotoelementides toimuvate protsessidega. Need fotoelektrilised nähtused pole midagi muud kui kunstliku fotosünteesi esimene etapp, mis toimub väljaspool elavat lehte.

Muidugi, siin on veel palju ebakindlat ja mõistatuslikku. Seni pole õnnestunud kunstlikult tekitada fotosünteesi teist etappi, s. o. rakendada valguse toimel aines tekitatud elektrienergiat uute ühendite tekitamiseks. Kuid julgelt unistava teadlase juurdleva pilgu ees avaneb juba pilt tulevikku.

Me ei tea veel, missugune on päikesekiirte «konserveerimise» seadme välimus. Kuid kutsume appi fantaasia.

Laiale madalale kanalile, mida mööda voolab must

vedelik, langevad päikesekiired. See vedelik on vesi, millesse on segatud praegu veel tundmatuid lisandeid — katalüsaatoreid, värve. Vedelik neelab peaaegu täielikult päikesevalguse ja tulemusena omandab võime imeda endasse õhust süsinikku ja võib-olla ka lämmastikku. Kanali lõpus vedelik tunduvat tiheneb ja muutub raskeks sültjaks kunstliku orgaanilise aine massiks. Siinsamas lõigatakse ta tükideks, eemaldatakse kanalist ja saadetakse ümber töötlemiseks keemiatehasesse.

Võib-olla hakkab inimene nii valmistama tuhandeid ja miljoneid tonne uut, õhust saadud kütust, kindlustama tööstusele väärtusliku tooraine enneolematu külluse.

Kasutada maksimaalselt päikese kiirgusenergiat — see on suund, mille poole püüab meie teadus!

«TAGAVARAKS» KOGUTUD VALGUS

Niisiis, ventiilfotoelemendid täitsid meie lapsepõlveunistuse. Nad «püüdsid» kinni valguse, muutis selle elektrienergiaks ja sundisid tööle. Ei leia lihtsalt sõnu, see on nii suurepärane. Kuid andes vaba voli fantaasiale, saame unistada ka veel muust.

Don Quijote, pöördudes kujuteldava südamedaami poole, lubas kinkida talle «klaasnõusse püütud päikesekiiri». On see tühi hooplemine? Aga muuseas, kui mugav see oleks: päeval püüda päikesekiiri, sulgeda nad mingisse purki ja õhtul lasta nad välja, et nad valgustaksid tänavaid! Kuid selgub, et pooljuhtide ilmumisega on kogu see fantaasia muutunud reaalsuseks.

Pooljuhtide hulgas on niisuguseid, mille aatomid päeval neelavad valgusenergiat, öösel aga kiirgavad selle välja. Füüsikud räägivad, et nende ainete aato-

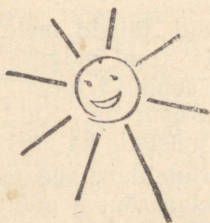
mid, neelates footoneid, koguvad endasse energiat. Teatud aja möödudes nad vabanevad sellest energia ülejäägist, kiirates välja footoneid.

Niisuguseid aineid tuntakse ja kasutatakse ammu. Näiteks on suur edu nääriehetel, mis pimedas säraavad «tagavaraks» kogunud valguse arvel.

Kuid neil ainetel on üks suur puudus. Kui me neid päeval valgustame, siis hakkavad nad öösel igal juhul helendama, kas me seda tahame või ei. Aga mis siis, kui sundida neid andma valgust käsu järgi? Selgub, et ka seda on võimalik teostada.

Mõnede pooljuhtide aatomid suudavad kogutud valgusenergiat hoida seni, kuni neid ei ergutata nõrga elektrilise signaaliga.

Selgitame seda lihtsa analoogiaga. Kujutlege, et teil on käes vedruga mängupüss. Selleks et püssi laadida, surute te vedru kokku, aga enne lasku vajutate päästikule, vabastades sellega vedru. Samuti on ka aatomitega: need nagu «laaduksid» valguse



mõjul, kui me neid aga kergelt elektriväljaga puudutame, laevad nad end tühjaks ja seega nagu tulistavad valgusega.

Võib-olla, et meie linnadesse ilmuvad varsti suurepärased valgustid, mis päeval koguvad valgusenergiat ja öhtul või öösel hakkavad nõrga elektrilise käsu peale kogunud energia arvel valgustama.

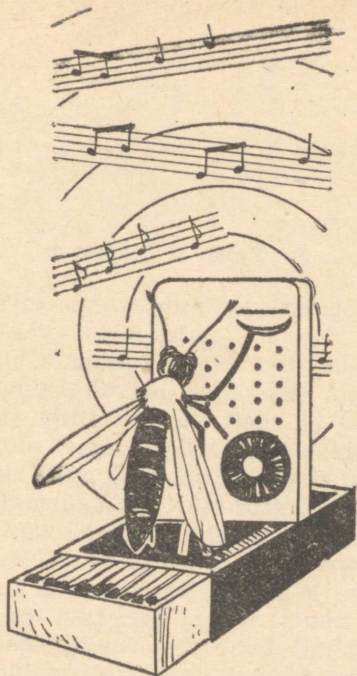
On teateid, et Tšehhoslovakkias töötatakse kilbi-kujuliste valgustite kallal, millel elektrivälja mõjul hakkavad helendama erelistest pooljuhtidest pulbrid. Valget valgust pole seni veel õnnestunud saada, kuid uurijad on veendunud selle töö edukuses.

Toad helendavate tapeetite ja lagedega, mis mahedalt kiirgavad valgust — võib-olla, et mõne aasta pärast muutub see niisama igapäevaseks, nagu on meie päevil hõõglamp.

Pooljuhtidel on veel palju teisi huvitavaid optilisi omadusi. Näiteks võivad nad muuta nähtamatud ultravioletsed kiired nähtavateks. Sellel põhinevad ka kõigile tuntud luminesentslambid, needsamad, mis valgustavad metroojaamu, kunstinäitusi, kauplusi ja tehaste tsehhe. Mõned pooljuhid reageerivad valgusesähvatustega, kui neid tulistatakse radioaktiivse kiirguse väikeste osakestega. Seda omadust kasutatakse eriliste tuumaosakeste loendajate ehitamisel. Televiisorite ekraanidel helendab samuti pooljuhtluminofoor, mille «süütavad» elektronide löögid.

Alles hiljuti õppisid füüsikud valmistama «igavesti» helendavaid osuteid. Neid pole vaja lülitada ei elektrivõrku ega ühendada patareiga. Nad helendavad iseenesest, ilma igasuguse kõrvalise energiaallikata. Niisugusele osutile on peale kantud pooljuhtluminofoorikiht, mis helendab kiiresti liikuvate elektronide toimel. Need elektronid lendavad välja strontsiumi radioaktiivse isotoobi aatomite tuumadest. Osutid töötavad üle kahekümne aasta.

Kui niisugused valgustid paigutada näiteks jõgede poidesse, siis poivalvur ei peaks iga päev süütama laternaid, vaid tal tuleks neid elu jooksul vahetada kõigest kaks kuni kolm korda.



ELEKTROONIKA KRISTALLIDES

ÕNNETU OSTJA

Ühe raadiokaupluse direktor, raadiovastuvõtjate kaubanduse veteran, jutustas:

«Juba kolmkümmend aastat käib meie poes üks veider vanamees. Arvate, et ta selle aja jooksul on palju ostnud? Mitte midagi! Raha ja tahtmist näib tal olevat, kuid viga on selles, et tehnika läheb liiga kiiresti edasi. Nagu ma mäletan, tahtis ta kõigepealt osta detektorvastuvõtjat. Kuid rääkides müüjaga, sai ta teada, et varsti tulevad müügile lampvastuvõtjad, ja ta otsustas oodata. Ilmusid esimesed lampvastuvõtjad. Uuesti ilmus ka ostja, kuid ei ostnud jällegi midagi, sest sai teada, et on oodata uusi, mitmelambilisi superheterodüünvastuvõtjaid. Siis muutusid ka superheterodüünvastuvõtjad igapäevasteks. Kuid veidrik väljus jällegi kauplusest, ilma et oleks midagi ostnud. Ta ootabki kuni praeguseni uut, ja mitte asjata! Iga aastaga aparaatur üha täieneb, muutub ökonoomsemaks ja töökindlamaks. Kuid mitte kunagi ei jõua see naiivne inimene oodata kõige paremat vastuvõtjat, niisugust, mis mõne aasta möödudes ei oleks vananenud.»

Aleksander Stepanovitš Popovi geniaalne leiutis — raadio — on viimase kümne aasta jooksul teinud läbi tormilise arengu. Kuid veel suuremad, praegu isegi raskesti kujuteldavad edusammud ootavad teda tulevikus. See progress on inimeste särava mõistuse

ja kuldsete käte sünnitis. Need on inimesed, kes ei oota passiivselt uut, vaid loovad seda ise. Ja ka siin on pooljuhtmaterjalid inimese suurepäraseks abilisteks.

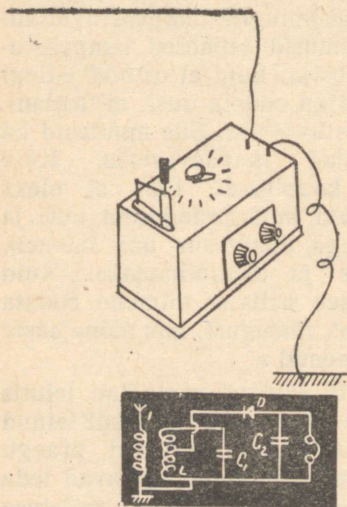
ESIMENE SAMM

Millest alustab noor raadioamatöör?

Detektorvastuvõtjast.

Selle aparaadi ehitus on äärmiselt lihtne. Traadist pool, näotu detektorikivike, kõrvaklapid — ja ongi kogu tarkus. Aga missugune muinasjutuline jõud on peidetud nende lihtsate detailide ühendusel!

Küsi vanema põlvkonna inimestelt, kes oma kätega valmistasid esimesi detektorvastuvõtjaid, ja te kuulete, et tänapäeva televiisor tekitab vähem rõõmu kui need puust kastikesed.



Detektorvastuvõtja.

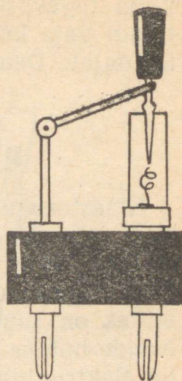
Kokkupandud vastuvõtja on pidulikult asetatud lauale. Tema valmistaja ronib katusele ja tõmbab üles 30—40 meetri pikkuse antenni, mille ühendab vastuvõtjaga. Siis askeldab ta mõni aeg detektoriga. Surudes elastse vedru otsaga klaasitorukeses asuvat hõbedast kristalli, katsub ta leida selle tundlikku punkti. Ja niipea, kui see õnnestub, teostub kauaoodatud «nõidus»: kõrvaklappides on kuulda muusikat või kõnet.

Detektori kristall oli esimene pooljuht, mis leidis laialdast praktilist kasutamist. Milleks on seda vaja?

Raadiolained tekitavad antennis kiirelt suundamuutva elektrivälja, mis paneb liikuma elektronid juhtmes. Need lendavad selles kord edasi, kord tagasi. Niisugune elektronide võnkumine toimub tuhandeid kordi sekundis. Selleks et kuulata ülekanne, on tarvis see võnkumine nagu poolitada, nii et kõrvaklappidesse satuks ainult ühele poole suunatud elektronide liikumised. Sel juhul vahelduvvool niioelda õgvendatakse, s. o. muudetakse pulseerivaks alalisvooluks. Aga tema tugevuse suhteliselt aeglastes muutustes (sadu ja tuhandeid võnkeid sekundis) ongi peidetud ülekantav heli.

Mida suurem on alaldatud voolu jõud, seda tugevamini tõmbab elektromagnet kõrvaklappide terasembraani. Voolu nõrgenedes membraan eemaldub elektromagnetist. Membraan vibreerib, annab oma võnkumise edasi õhule, ja ümberringi levivad helilained.

Niisugune on lühidalt kõige lihtsama raadiovastu-



Harilik detektor.

võtja tegevuse olemus. Nagu näha, on siin peale traadi vaja kõigest kahte seadet — kõrvaklappe ja alaldajat. Detektor ongi alaldajaks.

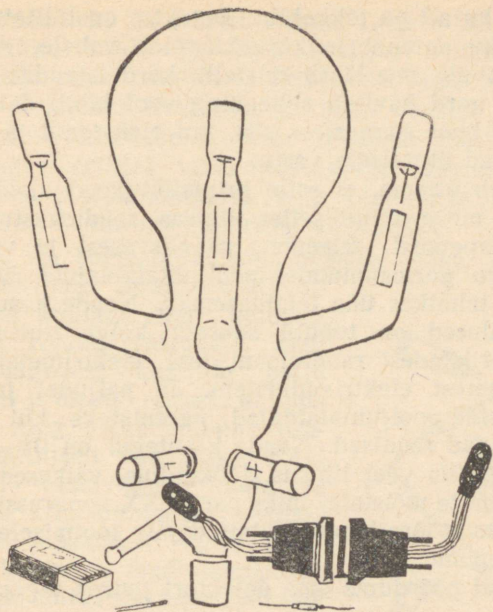
DETEKTOR TÖÖTAB

Klaastorukeses asetsev kristall on pooljuht. Ta võib olla nii elektron- kui ka aukjuhtivusega, aga oletame, et ta on elektronjuhtivusega pooljuht. Kuid kristall pole ühtlane. Ta pinnal juhtub olema kohti, milles on suuremal või vähemal määral lisandeid. Nende hulgas on ka niisuguseid, kus lisandite mõjul on elektronjuhtivusega pooljuht muutunud aukjuhtivusega materjaliks. Kuid elektroonse ja aukjuhtivusega piirkondade piirile tekib tingimata meile tuntud tõkkekiht ehk tsoon, kus puuduvad nii elektronid kui ka augud.

Meenutame selle kihi iseärasust: ühel küljel seisaksid valvel nagu elektronidest «piirivalvurid», mis tõukavad kõik vabad elektronid elektronjuhtivusega piirkonna sügavusse. Teisel küljel valvavad augud, mis, nagu mäletate, tõukavad teised augud aukjuhtivusega piirkonna sügavusse. Ühe sõnaga, tõkkekihis tekib piiriäärne elektriväli, mis takistab elektronide ja aukude liikumist pooljuhi elektron- ja aukjuhtivusega piirkondade kokkupuute piiril.

Tõkkekihi juurde toome välise elektrivälja. Olevalt suunast see kas lisab oma jõu piirivalvurite jõule pooljuhis (laiendab tõkkekihti) või, vastupidi, nõrgendab või isegi sootuks hävitab «piirivalvurid» — elektronid ja augud.

Kui aga kasutada vahelduvat, s. o. suundamuutvat elektrivälja? On selge, et tõkkekiht hakkab perioodiliselt kord paksenema, kord kaduma. Piiriäärne valve kord tugevneb, siis aga kaob hoopis. Kõik see



Elavhõbelampalaldaja. Ta on suur, eba-
 ökonoomne ja habras. All — germaanium-
 alaldaja, mis paistab silma oma lihtsuse,
 töökindluse ja ökonoomsuse poolest.

toimub välise välja suuna muutumise taktis. Ja tule-
 mus on järgmine: tõkkekihi laienemise momendil
 vool ei läbi pooljuhti (elektronid ja augud liiguvad
 eri suundadesse), tõkkekihi kadumise momendil läbib
 vool kristalli (elektronid ja augud liiguvad üksteisele
 vastu).

Teeme kokkuvõtte. Detektori tundlik punkt on
 osake pooljuhi pinnast, kus voolukandjad on teistsu-
 gused kui ülejäänud kristallis. Tähendab, vedru

teraviku all on tõkkekiht. Detektor on lülitatud järjestikku antenni ja kõrvaklappide vahele. Antenni elektriväli, mis läbib kristalli, kord lalendab tõkkekihti, kord hävitab selle ning vool läbib detektorit ainult ühes suunas — siis, kui elektronid ja augud liiguvad üksteisele vastu.

Peab ütleva, et selle printsiibi järgi alaldatakse voolu mitte ainult selles lihtsas raadiovastuvõtjas. Vasehapendist, seleenist, väävlisvasest ja viimasel ajal ka germaaniumist pooljuhtalaldajaid rakendatakse tehnikas üha laialdasemalt. Nende kasutamise võimalused on tohutu suured: kõige lihtsamatest mõõteriistadest radiojaamadeni, elektrimetallurgia-seadmetest elektriveduriteni. Ja paljudel juhtudel osutusid pooljuhtalaldajad paremateks kui teised alaldavad seadised. Nende kasutegur on 98—99%. Lisage siia veel lihtsus, töökindlus, väikesed mõõtmed, ja te mõistate, miks partei XX kongressi direktiivides pöörati pooljuhtalaldajate tootmisele erilist tähelepanu.

Kuid pöördume oma detektori juurde tagasi.

OLEG LOSSEVI LEIUTIS

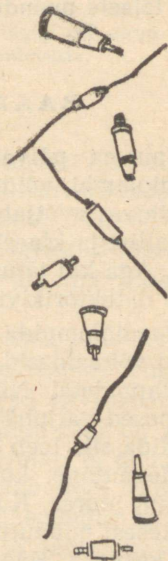
Esimesed detektorid olid veel väga ebatäiuslikud. Sageli leiti tundlik punkt suure vaevaga, sest vedru libises sellelt kergesti ära. Vastuvõtjat pidi üha uuesti töökorda seadma. Detektori omaduste parandamiseks näitasid insenerid üles palju leidlikkust.

1919. a. detektori täiustamisest unistav noor raadioamatöör Oleg Vladimirovitš Lossev alustas sellega, et astus käskjalaks meie maa esimesse raadiolaboratoriumisse Nižegorodis. Siin tõmbas teadusehimuline ja andekas noormees endale kohe tähelepanu. Laboratoriumi töötajad aitasid tal oma hari-

dust täiendada ja varsti alustas Lossev iseseisvat teaduslikku tööd. Ta uuris hoolikalt looduslikke mineraale, mida kasutati detektoritena, õppis tundma nende elektrilisi iseärasusi ja 1922. aastal jõudis ootamatule avastusele. Noor teadlane tõestas, et ühendades erilisel viisil vastuvõtja skeemi kaks detektorit ja elektripatarei, võib tugevdada kõrva-klappidesse tulevaid elektrilisi võnkumisi.

Tolle aja kohta oli Lossevi avastus väga tähtis, sest hariliku detektorvastuvõtjaga sai kuulata ainult lähedasi jaamu. Kauge vastuvõtt, eriti aga mägedes, kus on palju segajaid ja osutub raskeks ehitada kõrget ning pikka antenni, osutus praktiliselt võimatuks. Kuid Lossevi vastuvõtjad, mida ta nimetas kristadüünideks, võtsid kindlalt ülekandeid vastu võrdlemisi kaugetelt raadiojaamadelt. Leiutaja ehitas ka teisi aparate kristallidega — generaatoreid, s. o. elektrivõngete ergutajaid.

Lossev trükkis otsekohe oma avastuse, ei võtnud patenti ega nõudnud selle eest ka mingisugust rahalist autasu. Paljudes maades hakkasid raadioamatöörid ehitama vastuvõtjaid tema skeemi järgi. Ameerika ajakiri kirjutas: «Noor vene leiutaja andis oma leiutise maailmale.» Prantslased kordasid: «Lossevit ootab teaduslik kuulsus. Ta muutis oma avastuse üldrahvalikuks



Tänapäeva pooljuhtseadmed — esimeste primitiivsete detektorite ja diodide järglased.

omandiks, mõeldes eelkõige oma sõpradele — kogu maailma raadioamatööridele.»

Mitu aastat püsis leiutaja nimi pidevalt ajakirjade lehekülgedel, kuid hiljem hakkas aegamööda kaduma. Kahekümnendate aastate lõpuks tema idee kasutada kristalle elektrivõngete võimendamiseks ja genereerimiseks unustati. Teadus ei olnud veel küllalt küps, et seda ideed loovalt, ülesehitavalt edasi arendada. Polnud loodud pooljuhtide teooriat ja kunstlikult ei osatud niisuguseid aineid peaaegu üldse saada. Kõik raadioinsenerid panid oma lootused teisele uuendusele — raadiolampidele.

RAADIOLAMP TÖÖTAB

Vanema põlve raadioamatöörid mäletavad hästi raadiolambi võidukäigu esimesi aastaid. Miljonites raadiovastuvõtjates asuvad uhkete ridadena need metallist ja klaasist riistad, säravad, õrnad ning haprad. Aga kui täiuslikud olid nad, võrreldes primitiivsete detektorikivikestega!

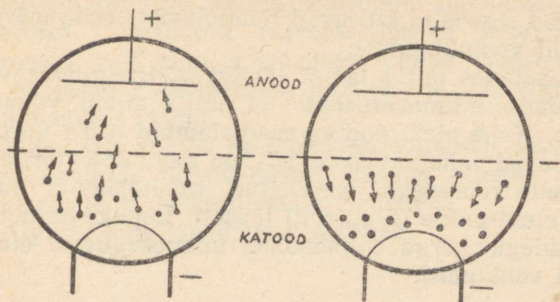
Raadiolampide üle võis tõepoolest uhke olla, sest need võimaldasid kuulata raadiot ilma tüütavate kõrvaklappideta! Nimelt siis ilmusid meie kodudesse esimesed valjuhääldajad.

Mida siis teeb raadiolamp?

Meenutage, kuidas te täna hommikul pesite veekraani juures. Kui kraan on hästi reguleeritud, aitab väikesest puudutusest, et veevool tunduvalt väheneks või kasvaks. Käe tühine liigutus põhjustab veevoolu järsu muutuse.

Midagi niisugust toimub ka raadiolambis. Antenni elektrivälja vaevaltmärgatavad võnkumised muudetakse seal võimsaks elektronide vooluks.

Kuidas seda praktiliselt teostada?



Vaakuumtriودي skeem. Vasakul — lamp on «avatud», paremal — lamp on «suletud».

Kõige lihtsam raadiolamp on õhutühi klaasballon, mille sees on kolm üksteisest isoleeritud metall-elektroodi — katood, võre ja anood. Katood ja anood on lülitatud kõrge alalispingega välisesse elektriahelasse, võrele satuvad aga antenni nõrgad signaalid.

Katoodi peenike niit hõõgub elektrivoolu mõjul ja seepärast eralduvad temast elektronid. Tugev elektriväli haarab neid ja nad hakkavad viivitamatult liikuma anoodi poole. Kuid elektronide teel on ees võrespiraal. Oma nõrga väljaga mõjutab ta märgatavalt lendavaid elektrone: kord laseb neid vabalt läbi, kord aeglustab nende lendu, vähendades lampi läbivat voolu; kord tõukab elektronid tagasi katoodile, s. o. «suleb» lampi. Kõik need elektronide voolu muutused toimuvad võre elektrivälja muutumise taktis. Elektronide vool sarnaneb veejoaga torustikus, kusjuures võre meenutab kraani. Ja nii nagu kraani kerge liikumine põhjustab järske veevoolu muutusi torus, nii ka antenni poolt kinni püütud

nõrgad signaalid kutsuvad raadiolambis esile märgatavaid vooluimpulsse.

Kasutades mitut lampi järjest võib signaale võimendada mitmekordseks. Ja mitte ainult võimendada. Kahe elektroodiga raadiolambid (ilma võreta) alaldavad vahelduvvoolu, s. t. on nagu detektoriteks. Lisaelektroodidega varustatud raadiolambid juhtivad elektronide voolu eriti täpselt. Lõpuks on nende riistadega kerge võimendada mitmesuguseid elektrilisi võnkumisi.

TRIUMF JA KRIIS

Teadlaste ja inseneride kätes muutus raadiolamp võimsaks relvaks tehnika arengus. Pidevalt täienedes vallutas ta mõne aastaga kogu raadiotehnika. Tänu temale arenes kaugnägemine, ilmus raadiolokatsioon, raadionavigatsioon, tekkis helikino, heli magnetiline lindistamine ja palju teisi suurepäraseid avastusi. Toimus tõeline tehniline revolutsioon, mille tulemusena loodi uus laialdane teadusharu — elektroonika.

Näis, et tuleviku raadiotehnika on lahutamatult seotud raadiolampidega. Kuid möödus kümnekond aastat ja hakkas selguma, et raadiolambid pole sugugi ilma vigadeta.

Polaartalvituse ajal kaotas radist raskesti saavutatud ühenduse raadiolambi järjekordse läbipõlemise tõttu. Lennuk maandus ebaõnnestunult, sest parda raadiojaama lambid ei talunud rappumist ja riknesid. Enamikul juhtudel olid raadiote rikked tingitud just lampide lühikesest elueast. Nende töö kestust arvestatakse sadade ja tuhandete tundidega, kaasægselt tehnikat see aga ei rahulda. Ja vähehaaval omandasid nad raadiosüsteemide kõige ebakindlamate ja kapriisemate elementide kuulsuse.

Hiljem osutusid ka raadiolampide mõõtmed liiga suurteks. Tänapäeva raadioseadmetes pole mitte kümneid, vaid sadu ja tuhandeid lampe. Konstruktoril on raske kombineerida neid nii, et nad võtaksid minimaalselt ruumi.

Kõik see sundis raadioinsenere tõsiselt mõtlema raadiolampide asendamisest mingite muude, kompaksemate ja töökindlamate riistadega.

Algasid uute lahenduste otsingud.

MILLEKS ON VAJALIK TÜHJUS

Teadlased arutasid, et iga lampraadiovastuvõtja sisaldab endas raskestisobitatavaid konstruktsioonilisi elemente, nagu tahke keha ja tühjus. Juhtmed, kondensaatorid, poolid, takistid on kõik tahked, neid kõiki võib kinnitada ja muuta pikaks ajaks vastupidavateks. Ent kuidas on raadiolampidega? Selleks et suurendada lampide vastupidavust, valmistatakse nende balloone metallist, spetsiaalsetest plastmassidest ja keraamikast. See muidugi aitab. Siiski säilib peamine ebamugavus — tühjus. Keeruliste elektrootseade monteerimine, katodi niidi kuumutamine — kõik tuleb teostada tühjuses. Kõik on seal õrn, peenike, kardab tõukeid ja põrutusi.

Näis, nagu oleks tühjus asendamatu. Tühjuses elektronide voolud nagu paljastatakse, nad muutuvad kättesaadavaks reguleerimisele, satuvad raadiolambi võre nõrga elektrivälja mõju alla.

Kas elektronide liikumist on võimalik juhtida aga ainult tühjuses?

Mis oleks, kui prooviks tühjuse asemel pooljuhtkristalli? Ilmselt tuleb temast vool läbi lasta ja väljast muuta kristalli elektrijuhtivust. Aga kui see üldse on võimalik, siis kuidas seda teha?

Nende küsimuste lahendamisest olenes kogu raadiotehnika edasine areng.

Nii elas O. V. Lossevi idee võimendajatest ja generaatoritest kristallide baasil üle taassünni uutel alustel.

Muidugi, palju on muutunud. Kasutada sel eesmärgil harilikke detektoreid oli ebaotstarbekohane — nende efektiivsus oli väike. Jutt oli niisuguse kristallidega aparadi loomisest, mis kindlalt võib võistelda kaasaegse raadiolambiga.

Mitte kohe ei leitud teed probleemi lahendamiseks. Oli palju otsinguid, nurjumisi, kahtlusi. Kuid lõpuks leiti vastus: kristalli juhtivust saab muuta ja seega võib ehitada pooljuhtaparaadi, mis asendab raadiolampi. Aparadi teooria töötas välja ameerika füüsik William Shokly. 1948. aastal ehitasid tema kaasmaalased Bardin ja Brattain esimesed aparadid, nimetades neid kristalltrioodideks ehk transistorideks.

Missugune on nende ehitus? Sellest me jutustame natuke hiljem. Kõigepealt mõni sõna materjalist, millest neid valmistatakse.

ENNUSTATUD AINE

Kristalltrioode valmistatakse peamiselt pooljuhist germaaniumist. Me juba rääkisime selle aine rakendamisest; mis põhjustas suure pöörde pooljuhtide füüsika ja tehnika arengus. Germaaniumiga on seotud ka teine huvitav lehekülj loodusteaduse ajaloos.

1869. aastal, kui Dmitri Ivanovitš Mendelejev lõi oma kuulsa perioodilisuse süsteemi, ei teadnud keegi veel germaaniumi olemasolust. Kuid puhtteoreetilistel kaalutlustel ennustas geniaalne keemik tema avastamist. Teadlane leidis talle koha oma mitmekorru-

selises tabelis ja määras isegi ette, missugused on selle elemendi põhiomadused. Vastavalt perioodilisuse seadusele pidi see tundmatu element mitmeti sarnanema tuntud elemendi räniga. Seepärast andis Mendelejev talle leppelise nimetuse ekasiliitsium (siliitsium on räni ladinakeelne nimetus ja eesliide «eka» tähendab sanskriti keeles «sarnane»).

Möödus kuusteist aastat, ja tähelepanuväärne ennustus täituski. Saksa uurija Winkler leidis looduslikest mineraalidest ekasiliitsiumi ja andis talle oma kodumaa nime. See oli teadusliku mõtte tõeline triumf.

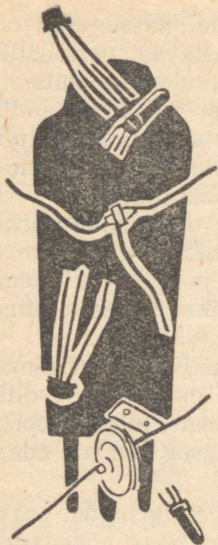
Winkler kirjutas: «Vaevalt võiks leida veel silmapaistvamat tõendit selle kohta, et õpetus perioodilisusest on õige... See pole lihtsalt julge teooria kinnitus, siin me näeme... võimsat sammu edasi inимtunnetuse vallas.»

Alguses ei leidnud uus element mingisugust praktilist rakendamist. Kaua aega olid tema hõbedaselt sätendavad kristallid ainult keemiliste kollektsioonide unikaalseteks eksponaatideks. Seevastu on germaanium viimastel aastatel muutunud üheks tähtsamaks tehniliseks materjaliks. Ja oma kuulsuse tipule jõudis ta siis, kui muutus kristallidega varustatud aparaatide põhialuseks — raadiolampide asendajaks.

POOLJUHTVÕIMENDAJA

Meie ees on germaaniumtriiod, kristall, mis asendab tühjusest ja klaasist raadiolampi. Ta sarnaneb tillukese herneterasuuruse seenega, mille kübarast ulatuvad välja kolm juhet.

Avage ta ning te veendute, et isegi selle miniatuurse eseme mahust moodustab suurema osa korpus, kristall ise on aga kümneid kordi väiksem.



Pooljuhttrioodid.
Kui palju nad on
väiksemad raadiolampidest!

Vaatleme, missugune on ta ehitus ja kuidas juhib ta elektronide voolu.

Metallist alusele, mida nimeatakse baasiks, toetub elektronjuhtivusega germaaniumist kristallplaadike. Ülemisele kristalli pinnale on spetsiaalse töötlemisega moodustatud aukjuhtivusega piirkond. Auk- ja elektronjuhtivusega piirkonna vahele, nagu alati niisugustel juhtudel, tekib tõkkekiht. Kristalli pinnale on kinnitatud kõrvuti kaks peenikest plaatinatraati. Üht neist nimetatakse emitteriks, teist kollektoriks.

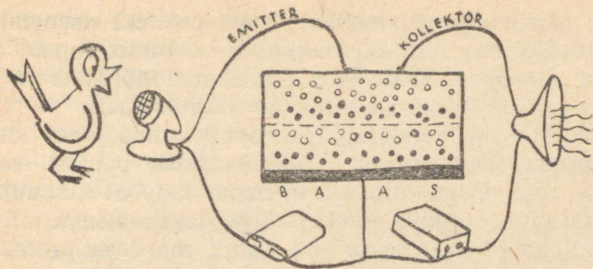
Emitter, kollektor ja baas moodustavad kristallvõimendaja kolm elektroodi, millele raadiolambis vastavad katood, anood ja võre. Kuid võimendusskeemi ei paigutata kristalli mitte nii nagu raadiolampi.

Tüürivate signaalide allikas lülitatakse baasi ja emitteri vahele. Lülitamisel arvestatakse seda, et tõkkekiht ei töötaks takistusena tüürivatele signaalidele (signaalide elektriväli suunatakse vastupidi tõkkekihi elektriväljale).

Küllalt kõrge pingega juhtiva voolu allikas ühendatakse läbi takisti kollektori ja baasiga. Kuid ta lülitatakse vastupidises suunas, selleks et tõkkekiht ei laseks voolu läbi.

Skeem on valmis. Anname juhtiva signaali.

Läbi emitterijuhtme tungib elektriimpulss kristalli aukjuhtivusega piirkonda. Ta murrab läbi



Pooljuhttrioodi skeem.

tõkkekihi ja kisub sinna kaasa auke. Nii emitter nagu süstib auke kristalli elektronjuhtivusega piirkonda. Ekseldes lühikest aega kristallis, jõuavad augud kollektorisse viiva juhtme alla. Kui aga tõkkekiht hetkeks rikastatakse aukudega, muutub ta elektrijuhiks ka kõrgepingevoolule, mis on lülitatud baasi ja kollektori vahele. Selle voolu tõuge läbib tõkkekihti «keelatud» suunas, mis kohe kajastub trioodi välises ahelas. Seal tekib võimendatud signaal, mis on seda tugevam, mida lähemal asuvad kristallis emitteri- ja kollektorijuhtmete otsad.

TEED KRISTALLIDELE

Seega võimendasime me kristalli abil nõrga elektrilise signaali ilma raadiolambita. Kristall on töökindel, kõva, vastupidav ja ei purune nagu klaasballoon.

Germaaniumikristallide spetsiaalse töötlemisega saab valmistada niinimetatud tasapinnalisi pooljuhttriode. Neis on kristall jagatud kolmeks võrdlemisi suureks elektron- ja aukjuhtivusega piirkonnaks.

Tasapinnalised trioodid ei vaja peeneid sisenemisjuhtmeid, seetõttu on nad veel vastupidavamad ja pikemaajalised. Peale selle võivad nad läbi lasta palju tugevamaid voole ja töötavad stabiilsemalt.

Pooljuhtvõimendajad paistavad silma veel ühe suurepärase omaduse — ökonoomsuse poolest, sest pole vaja enam kulutada energiat katoodi kuumutamiseks ja tugeva elektrivälja tekitamiseks. Kui raadiolambi kasutegur on ainult murdosa protsendist, siis kristalltrioodil ulatub ta 50—60 protsendini.

Kõik saavutatu on muidugi suur võit. Kuid pooljuhtaparaatidel on olemas ka puudusi.

Ülipeened sisenemisjuhtmed, õhukesed kihid, tühine kaugus elektroodide vahel — kõik see peaks muutma kristalltrioodi erakordselt kiiresti töötavaks riistaks, s. t. ta peaks suutma võimendada erakordselt suure sagedusega elektrilisi võnkumisi. Kuid tegelikult on asi hoopis vastupidi. Tahkes kehas, kristallis, pole elektronid nii vabad kui raadiolambi tühjuses. Nad on nagu surutud üksteise vastu ja neil pole võimalust liikumiseks. Seepärast on tänapäeva raadiotehnikas tähtsad ülikõrged võnkesagedused kristallaparaatidega seni veel saavutamata.

Paljudes maades püüavad füüsikud muuta pooljuhtseadmeid «painduvamateks», kiiresti reageerivateks. Sel alal on saavutatud ka mõningat edu. Küllalt «väledad» on näiteks trioodid, mille väline pind on elektron-, kristall ise aga aukjuhtivusega. Sel juhul süstib emitter tõkkekihti elektrone, mis on aga peaaegu kaks korda liikuvamad kui augud. Tulemusena protsessid, millest me rääkisime, kulgevad palju kiiremini. Seda tüüpi kristalltrioodid võimendavad igas sekundis kuni kümme miljonit elektrivõnget.

Ilmusid veel täiuslikumad kristallvõimendajad —

tetroodid, nelja erineva juhtivuspiirkonnaga pooljuhid. Kristallide hulgas on need tegevuskiiruse poolest rekordiomanikeks. Nad ergutavad ehk võimendavad kümneid, sadu, isegi tuhandeid miljoneid elektrivõnkeid sekundis. Suurema sagedusega võnkumised jäävad ilmselt ka tulevikus vaakumelektroonika alaks.

Neil uutel aparaatidel on rida teisigi puudusi. Kristallide baasil ei ole seni veel õnnestunud valmistada suure võimsusega aparatuuri. Germaaniumi omadused kuumutamisel tunduvalt muutuvad. Germaaniumvõimendajad ei talu temperatuuri tõusu. Seepärast eelistatakse viimasel ajal valmistada kristallvõimendajaid ränist, mis on vähem kapriisne.

Tõsi, siin on olemas huvitav väljapääs: ehitada pisikeste kristallvõimendajate juurde miniatuursed pooljuhtelektrikülmutid (neist te lugesite peatükis «Soojuse püüdmine»). Niisuguseid katseid on tehtud ja need on andnud häid resultate.

Kuid ikkagi juhtub mõnikord, et kristallvõimendaja, vaatamata igasugustele ettevaatusabinõudele, ilma mingi nähtava põhjusega muudab järsku omadusi. Üht tüüpi aparaadid ei tööta alati ühtemoodi. Siin on üheks põhjuseks see, et pooljuhtseadmete iseärasused pole küllaldaselt läbi uuritud ja pole lõpuni läbi töötatud ka nende tootmise tehnoloogia. Seepärast pole sugugi õige mõelda, et raadiolambid asendatakse kohe kõikjal pooljuhtidega.

Pooljuhid osutuvad küllaltki kasulikeks ka vaakumelektroonika arengus. Neist saadakse uusi kõrge efektiivsusega elektronide allikaid raadiolampidele, seadmeid, mis süütavad laengu elavhõbealaldajates ja palju muud. Pooljuht- ja vaakuumaparaatide vahel pole vaen, vaid sõbralik võistlus.

Mõlemal harul on ees suur uurimistöö uute skeemide ja uute konstruktsiooniliste lahenduste leidmi-

sel. Vaakuumelektroonikat rikastatakse suurepärase avastustega. Iga aastaga täiustatakse pooljuhttraadioaparatuuri. Hiiglaslik teadlaste, inseneride ja raadioamatööride armee rajab oma töödega väsimatult teed kristallidele.

TOOTMINE MIKROSKOABI ALL

Kristallriistas on kõik kompaktne ja lihtne. Kuid seda lihtsust ei saavutata kergelt. Miniatuurssesse pooljuhtvõimendajasse on pandud filigraanne töö.

Algul saetakse teemantsaega germaaniumist toorik spetsiaalsel pingil väga õhukesteks plaadikesteks. Need on nii väikesed, et neid on võimatu kätte võtta. Veel enam, need sorteeritakse ja puhastatakse keemiliste lahustitega. Mikroskoobi all ühendatakse kristalliga peaaegu nähtamatud traadid, mille teised otsad joodetakse jämedamate traatide külge. Seejärel kaetakse riist kaitselakiga ja asetatakse korpusesse, kusjuures vabaks jäänud ruum täidetakse erilise plastmassiga. Mõned operatsioonid tuleb sooritada vaakuumis. Monteerimise õigsust kontrollitakse elektriliste mõõtmistega. Kuid sellega ei ole asi kaugeltki lõpetatud. Pooljuhtvõimendajaga tuleb veel palju vaeva näha, enne kui ta lõplikult valmib.

Niisugune juveliirtöö tehakse peaaegu kõik käsitsi. Ja kerge on ette kujutada, kui suurt vilumust, kui palju peent meisterlikkust peab olema pooljuhtdetailide monteerijal.

Insenerid ja teadlased püüavad praegu mehhaniseerida ja isegi automatiseerida kristalldiodide ja -triodide tootmist.

Germaaniumi ja räni lõikamiseks hakati teemantsaagide asemel kasutama ultraheli. Kiiresti vibreeriva ultraheligeneraatori võllile kinnitatud žileti-

tera tungib rabadasse kristalli nagu lauanuga võisse. Töödelda mõnda kristalset pooljuhti harilike meetoditega on niisama raske kui näiteks kuivikust hammasrattast välja saagida. Ultraheli hoiab siin kokku materjali (töötlemisel tekib siin tunduvalt vähem laaste ja pole tarvis kallihinnalist teemanti), kiirendab tööd ja, mis peamine, annab võimaluse selle mehhaniseerimiseks.

Kasutatakse ka originaalset elektrokeemilist kristallide töötlemisviisi. Mõnede tasapinnaliste pooljuhttriöödide sortide juures on vaja ebatavaliselt õhukest (0,005 mm) germaaniumplaadikest. Neid ei saa valmistada mitte mingisuguse mehhaanilise töötlemisega. Kuid väljapääs siiski leiti.

Germaaniumist kristallplaadile suunatakse kahelt poolt õhukesed söövitavate lahuste joad, mis samal ajal täidavad ka juhtmete osa: nende kaudu juhitakse elektrivool patareist läbi pooljuhikihi. Nii-sugusel elektrokeemilisel teel söövitatakse kristalli poolteist kuni kaks minutit. Germaaniumplaadikese mõlemale küljele moodustuvad nõod, mille vahele jääb õhuke pooljuhi kile.

Seejärel kaetakse kile pinnad samal elektrokeemilisel menetlusel metallikihiga.

Töötlemise ajal on tarvis pidevalt ja täpselt reguleerida voolutugevust lahusejugades ja pooljuhis. Reguleerimist teostatakse germaaniumplaadile suunatud valguskiirega, sest selle pooljuhi juhtivus suureneb valguse mõjul tunduvalt. Mida tugevam on plaadikese valgustatus, seda suurem on ta elektrijuhtivus; järelikult suureneb ka vool, mis läbib sööbiva lahuse jugasid ja plaati.

Plaatriöödide tootmiseks kasutatakse ka difusiooninähtust, s. o. ühe aine aatomite aeglast tungimist teise aine aatomite vahele.

Soovitatakse ka teisi suurepäraseid võtteid kristall-detailide valmistamiseks.

Mõned õpetlased on seisukohal, et arvatavasti on võimalik kasvatada kristalle, mis koosnevad erinevatest kihtidest. Rea spetsialistide arvamus järgi võib ühes pisitillukeses kristallis luua terveid raadioelektroonilisi süsteeme, samuti nagu keemikud juba ammu saavad lahustest harilikke kristalle. Mis võiks olla kummalisem kui kolvis või tiiglis keemilisel teel valmistatud raadiovastuvõtja!

Ilmuvad ka omapärased masinad kristallvõimendajate monteerimiseks. Tehnika püüab selle poole, et pooljuhtriistade tootmine muutuks tõeliselt massiliseks ja et nad oleksid veelgi miniatuursemad. Inserterid räägivad praegu tõsiselt laste mänguklotsi suuruste matriitside loomisest, mis mahutaksid t u h a t kristalltriiodi. Ja nad mitte üksnes räägivad, vaid ka töötavad visalt selle probleemi lahendamise kallal.

UUED ÜLESANDED

Suur avastus ei jää kunagi isoleerituks. Ta püstitab uusi ülesandeid ja juhhib leiduri mõtet ka teistel aladel. Seda näeme eriti selgesti pooljuhtide juurutamisest raadiotehnikasse.

Niipea kui valmisid esimesed kristallvõimendajad, oli selge, et raadioaparaatide mõõtmed võivad järevalt väheneda. Kuid kohe kerkis küsimus: mis saab antennist? Kas tõesti jääb ta sama pikaks kui enne? Või näiteks induktsioonpoolid ja kondensaatorid? Sest kui me neid ei vähenda, tekib disproportsioon mitte ainult detailide mõõtmetes, vaid ka nende tehnilises tasemes. Tõepoolest, asetada suur traadist poolkõrvuti imepikese ideaalselt lihtsa ja täiusliku pooljuhtvõimendajaga on sisult sama kui küünaldega allmaarongi valgustamine. Nii küpses uus üles-

anne: kujundada ümber kõik raadiodetailid ja relvastada uuesti kogu praktiline raadiotehnika.

Ja jälle tulid siin appi pooljuhid, esmajärjekorras materjalid, mida nimetatakse ferriitideks.

Igaüks on näinud hobuserauakujulist magnetit. Seda võib leida valjuhääldajas, igas elektrigeneraatoris ja magneetos. Püsivmagnetitel on tõsine puudus — nad on väga rasked. Et nende kaalu vähendada, töötasid metallurgid välja spetsiaalseid sulameid. Mõned neist on küllaltki kallid. Kuid ega metalli ikkagi väga kergeks teha ei saa.

Märgime veel teise metalliliste magnetmaterjalide iseärasuse: nad juhivad suurepäraselt elektrit. Seda omadust loetakse paljudel juhtudel kasulikuks, näiteks karastamisel kõrgsagedusega. Vahelduv elektriväli ajab elektronid metallis laiali. Tulemusena tekiavad elektrivoolu keerised, mis tõstavad temperatuuri. Seda siin aga ongi just vaja. Seevastu on mõningatel teistel juhtudel soojenemine kahjulik.

Võtame näiteks transformaatori südamiku. Seda pole sugugi vaja soojendada, sest selleks kulub liigset energiat. Peale selle ei lase keerisvoolud magnetilist metalli kiirelt magnetiseeruda ja demagnetiseeruda, vaid pidurdavad neid protsesse. Aga tänapäeva radioaparaatides on sageli vaja väga «painduvaid» magnetilisi materjale.

Palju vaeva nägid elektrikud ja raadiotehnikud, et vabaneda keerisvooludest. Transformaatorite, drosselite ja poolide südamikud otsustati valmistada õhukestest isoleerlakiga kaetud terasplaadikestest. Neid südamikke valmistati raudlaastudega segatud isolatsioonmassist. Kasu sellest natuke oli, kuid taheti veel rohkemat. Ideaaliks oli leida niisuguseid kergeid magnetilisi materjale, mis peaaegu ei juhiks elektrivoolu.

Ja nimelt sellisteks osutusidki ferriidid.

KERAAMILISED MAGNETID

Välimuselt on ferriidid täiesti tavalised hallikasmustad plaadikesed, rõngakesed ja vardakesed. Nad on valmistatud kõige harilikumatest, looduses laialtlevinud ainetest, nagu raua ja mõnede teiste metallide hapenditest. Nende hulka kuulub ka harilik rauamaak ehk magnetiit.

Juba möödunud sajandil tundsid keemikud niisuguste ühendite koosseisu, sisemist struktuuri ja põhiomadusi. Tundus, et teadus võttis juba ammu neilt kõik, mida nad võisid inimesele anda.

Kuid tegelikkus näitas teist. Mõned aastad tagasi alustasid füüsikud ferriitide uurimist. Nad pulbristasid neid, segasid mitmesugustes vahekordades, pressisid, kuumutasid ja sulatasid kokku. Selgus, et spetsiaalse töötlemise korral omandavad need materjalid mitmesuguseid väga hinnatavaid elektriliste ja magnetiliste omaduste kombinatsioone.

Ferriitide hulgas on materjale, mis magnetiseeruvad välkkiirelt isegi nõrgas magnetiväljas ja muudavad kiiresti magnetiseeritust magnetivälja muutuste taktis. Sellest materjalist varras, mille ümber on mähitud traat, võib olla suurepäraseks antenniks.

Niisuguseid vardakesi näeme praegu paljudes

uuetübilistes raadiovastuvõtjates ja televiisorites. Antennid on niivõrd väikesed, et neid monteeritakse otse korpustesse. Näiteks vastuvõtjal «Dorožnõi» on pliiatsipikkune antenn, mis asendab mitut meetrit metalltraati. Magnetiline ferriitantenn võib olla isegi tuletikupikkune!

Poolide, transformaatorite ja drosselite ferriitsüdamikud on suurepärase kingitus raadiotehnikale. Kasutades niisugust südamikku, pole vaja võidelda pöörivooludega ega muretseda ümbermagnetiseerimise kiiruse pärast. Raske on uskuda, et tilluke elektrit juhtivast materjalist spiraal, mis on pintsliiga kantud ferriitplaadile (teiste sõnadega, on sinna joonistatud), mängib vastuvõtjas sama osa kui traadist valmistatud suur induktsioonpool.

Muidugi, spiraali võib mitte üksnes joonistada, vaid ka trükkida. Raske pole trükkida ka ühendusjuhtmeid ja takisteid (praegu tehakse neid punktiisuuruseid, mille jätab paberile terav pliiatsiots). Ja isegi kondensaatoreid saab trükkida, ainult mitte ferriidile, vaid teistest ainetest plaatidele — segnetoelektrikutele, näiteks niinimetatud baariumtitanaadidele.

Baariumtitanaadid ja teised sellised ained on samuti suurepärase materjalid tänapäeva raadiotehnikale. Nende hinnalised omadused avastas mõned aastad tagasi nõukogude füüsik, Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia korrespondeeriv liige B. M. Vul. Nende ainete abil õnnestus valmistada väga väikesi kondensaatoreid — ebaharilike omadustega, nn. varikonde, ehitada miniatuurseid antenne ja teisi seadmeid, mis tunduvalt lihtsustavad raadioaparatuuri.

Kristalltrioodide, dioodide, ferriitdetailide ja varikondide juurutamine näitab, et isegi keeruliste raa-

diotehniliste süsteemide — tervete raadiosaatjate või -vastuvõtjate mõõtmed võivad osutuda väga väikesteks. Neid võib valmistada ühest tükist omapärasel trükitehnilisel teel, umbes nii, nagu lastakse välja postkaarte või marke.

KRISTALLIDE TOITMINE

Igale raadioaparaadile peab andma energiat, kusjuures tavaline vastuvõtja tarvitab võimsust kümme- konda vatti. Energiat võetakse valgustusvõrgust, patareidest ja viimasel ajal ka termoelektrigeneraatoritest.

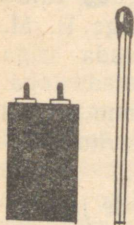
Kui aga raadiovastuvõtjad on postmargisuurused ja neid hakatakse õmblema pintsaku revääri külge? Kas tõesti tuleb neid ka siis lülitada võrku või ühendada suure ja raske patareiga?

Ei, miniatuurne pooljuhtidel töötav raadioaparaat ei vaja niisuguseid toiteallikaid. Ta kulutab energiat sada, isegi mitu tuhat korda vähem kui harilik tänapäeva raadioseade. Seepärast aitab talle väikesest patareist, mida praegu osatakse valmistada suure mahtuvusega ja pikaajalisena.

Siin ongi üks nendest — ta on kaks korda väiksem tuletikust, kaalub 5 grammi ja töötab üle aasta. On olemas ka nõobisuuruseid patareisid, mille tööiga on kaks aastat. Samuti on imepisi-kesi akumulaatoreid.

Veel huvitavam on niinimetatud aatomipatarei, mis suudab vahetpidamata töötada rohkem kui kakskümmend aastat.

Ehituselt meenutab aatomipatarei pooljuhtventiilfotoelementi, ainult energiaallikaks pole valgus, vaid radioak-



tiivne kiirgus. Ränikristallile, milles on erilise töötlemisega loodud elektron- ja aukjuhtivusega piirkonnad, on kantud radioaktiivse strontsiumi kiht — aine, mida saadakse aatomkateldes. Lagunemisel eraldavad strontsiumi aatomid nn. beeta-kiirgust, mis kujutab endast lihtsalt elektronide voogu.

Igaüks nendest, sattudes pooljuhti, vabastab selles kakssada tuhat elektroni.

Selle patarei võib juba valmistamise ajal monteerida raadiovastuvõtjasse. Patarei töötab seni, kuni aparaat vananeb (võib olla kindel, et kahekümne aasta jooksul see tõepoolest toimub).

Muuseas, pooljuhtvastuvõtjad saavad mõnikord läbi ka ilma patareideta. Energiat võivad nad saada näiteks ventiilfotoelementidelt. Hiljuti valmistasid ühe ameerika firma insenerid taskuvastuvõtja nelja kristallvõimendajaga. Hoides seda vastuvõtjat mõni aeg valguse käes, võib ta töötada 500 tundi täielikus pimeduses. Vastuvõtja kaalub 280 grammi.

Amatöörid mõtlesid välja veel teise suurepärase viisi raadioaparaadi toitmiseks ilma patarei kasutamisetä. Tibatillukesele pooljuhttraadiojaamale annab elektrienergiat — inimese hääl, seesama heli, mida antakse edasi raadio kaudu.

Te räägite mikrofoni, kus hääl muudetakse vooluimpulssideks. Osa pulseeriva voolu energiast läheb raadiosaatjasse võimendamiseks ja raadiolainete tekitamiseks. Teine osa mikrofoni voolust tasandatakse spetsiaalses seadmes ja ta kulub saatja ning ühtlasi ka raadiosignaali vastuvõtja toiteks. Ühe sõnaga, pooljuhtkristallide abil muudetakse heli raadiolaineteks. Kogu süsteem on ebatavaliselt kompaktne, raadiojaam mahub mikrofoni korpusesse.

Küsime raadioinsenerilt, kes on tuline pooljuhtide entusiast: «Kui väikeste mõõtmeteni võib viia raadioaparaadi, mis töötab kristallidel?»

Insener kehitab õlgu: «Meie päevil spetsialistid ei imestaks, kui nad loeksid teadet nisuterasuurusest raadiovastuvõtjast.»

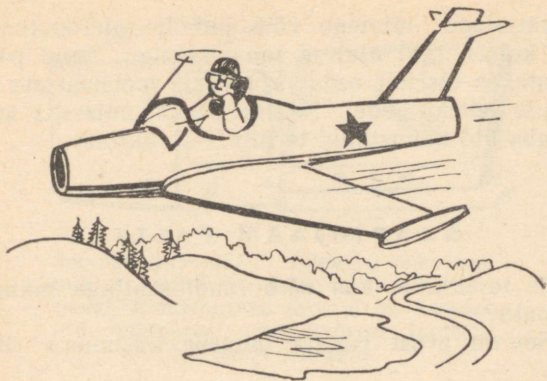
Olles vaimustuses sellest imest, sellest hämmastavast teaduse saavutusest, mõtleme me samal ajal tahtmatult tema praktilise kasutamise võimalustest. Ja kui juba tuli juttu nisuterasuurusest vastuvõtjast, tekib ka küsimus: milleks vajatakse sellist mikrokoopilist raadioaparaati? Ta sobiks ju sipelgapesade radiofitseerimiseks, oleks lihtsalt iluasjake nagu terasest kirpki, mida kirjeldas Leskov oma jutustuses «Vasakukäeline». Mäletate, tibatilluke «prügikübe», mida tuli üles keerata võtmega ja mis hakkas siis tantsima. Kui see raadioaparaat on paras Leskovi kirbule, mis on temast siis kasu? Mitte mingisugust.

Muidugi, pooljuhtide raadiotehnika ei püüagi raadioseadmete mõõtmete piiramatu vähendamise poole. Ülesandeks pole püstitada rekordeid miniatuursuses, vaid paigutada sobivatesse mahtudesse kõige täiuslikumaid seadmeid.

Missugused need on?

Portsigarisuurune keeruline raadiovastuvõtja ei ole enam kaugeltki harulduseks. Panete ta tasku ja võite bussiga tööle sõites raadiot kuulata.

Kristallidel ehitatud raadiosaatjat ja -vastuvõtjat on võimalik mahutada tikutoosi. See on suurepärane abi näiteks spordis. Parašütist, kes sooritab oma esimest hüpet, saab rääkida maa peal asuva vilunud seltsimehega ja kuuleb tema rahulikke nõuandeid. Treener annab raadio kaudu juhatusi slalomistidele, ujujatele ja jooksjatele.



Aga kui kasulikud on niisugused miniatuursed raadiojaamad ehitusel! Mürseppade brigadir võib kogu aeg pidada sidet tõstekraana masinistiga. Pole vaja karjuda, jäävad minevikku hüüded «maina» ja «viira» ning enam ei kasutata ruuporeid.

Edaspidi avanevad aga veelgi laiemad võimalused.

Kujutage endale ette tuleviku telefoniaparaati. See on kas väike plaadike pintsakutaskus või näiteks spetsiaalselt varustatud täitesulepea, mille ühel küljel on mikrofon, teisel tammetõruga sarnanev kuuldeklapp.

Ohtul jalutate te piki jõekallast, kui äkki taskust kostab terav piiksumine. See on väljakutsesignaal. Selgub, et vend, kes lendab Kaukaasia mäeaheliku kohal, otsustas jagada teiega oma muljeid lennuki alt möödalibiseva looduse ilust. Koduteel uus väljakutse — vanaema palub teid teed jooma.

Telefonitraadid muutuvad ülearusteks. Ultralühilained ühendavad meie kortereid, tehaseid ja õppeasutusi autode ja lennukitega, raudteerongide ja

jalakäijatega. Inimene võib pidada telefonikõnesid igas kohas, igal ajal ja iga punktiga. Meie päevil arutatakse tõsiselt seda probleemi spetsiaalsete ajakirjade lehekülgedel. Sellise sidepidamisviisi kohta on juba üldtunnustatud termin — «üldine».

RAADIOJAAM PALLIS

Mis te arvate, kas võib raadiosaatjaga mängida jalgpalli?

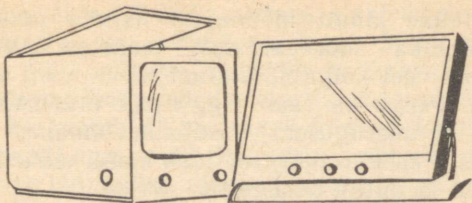
«See on arust lageda inimese küsimus,» ütlete teie.

Kuid selgub, et vastus on antud liialt kiirustades.

Pooljuhraaudioaparaate valmistatakse juba niivõrd vastupidavaid ja töökindlaid, et neid võib kinnitada pallinaha külge, ja pole karta, et jalgpallurite löökide tõttu aparaat rivist välja langeks. Aga mis on sellest kasu? Milleks on vaja raadiojaama palli paigutada?



Ameerikas on laialt levine-
nud sportlik mäng — golf.
Väikest kõva palli lüüakse
kepiga — pall hüpleb, vee-
reb ja satub auku. Sageli
aga kaob ta rohus või põõsas-
tes ära ja mängijatel tuleb teda
kaua otsida. Ja selleks et kii-
rendada otsimist ja et pallid ei
kaoks, tehti ettepanek paigu-
tada neile pooljuhraaudioasaat-
jad. Kui tugevalt palli ka ei
löödaks — raadiosaatja töötab
katkestamatult edasi. Ta kiir-
gab raadiosignaale, mida
saab püüda mängija keppisse



Joonisel paremal — tuleviku televiisor, mis on valmistatud täielikult pooljuhtidest. Elektrontoru asemel on kasutatud omapärasest metallvõrest lamedat kiirgavat ekraani.

ehitatud suundantennvastuvõtjaga. Kui pall läks kaduma, asetab mängija raadiokepi kõrva juurde ja leiab kergesti suuna, kust on kuulda kadumaläinud palli «häält». Siis on palli juba kerge üles leida.

Tõsi, see pooljuhtvõimendajate kasutamine kannab rohkem reklaami kui praktilist iseloomu. Samal eesmärgil monteeritakse kristallidega raadiosaatja harilikku lukkseparasarasse. Võib lüüa vasaraga nii tugevasti kui tahad, aga aparaat töötab edasi.

Niisuguseid raadiotehnika kurioosume, pooljuhtidest mänguasju, tehakse praegu palju. See annab eriti hea ülevaate kristalldiodide ja -trioodide suurest praktilisest väärtusest. Aparaadil, mida me pidasime hapraks ja õrnaks, on kivi vastupidavus. Teda võib asetada raketile ja kahurimürsku, et uurida nende lendu. Ka kõige rahunemas ümbruses töötab ta laitmatult.

Kui kindlateks muutuvad lennukite, helikopterite ja laevade raadioseadmed! Pole enam ohtlikud ka kõige teravamad löögid ega kõige tugevamad põrutused!

Me tõime ainult mõningaid näiteid pooljuhtide raadiotehnika suurepäraresetest teenetest. Võib-olla pole need veel kõige näitlikumad.

Kuid praegu on veel väga raske ette näha pooljuhtide mitmesuguseid kasutamisevõimalusi raadiotehnikas. Peaaegu iga päev toob kaasa teateid uutest leidudest ja uutest otsustest.

Ehitatakse tindipotisuurusi helilindistamisaparaate, televiisoreid ilma vaakuumtoruta ja tasapinnalise ekraaniga, mida võib riputada seinale nagu pilti või asetada lauale nagu pööratavat kalendrit. Kunagi ilmuvad ka taskuteleviisorid — taskuraamatukujulised nägemistelefonid.

TULEVIKU MUUSIKA

Klaver leiutati ligikaudu 250 aastat tagasi. Viu-
leid, tšellosid ja mitmesuguseid teisi vask- ja puu-
pille hakati valmistama veelgi varem.

Kõik need jõudsid sajandite jooksul kõrgeima täiuslikkuse astmeni. Võib veendunult öelda, et tänapäeva muusikariistadest, keelpillidest, puhkpillidest ja vibreerivatest õhusammastest (orelist) veel ilusamat heli saavutada on raske. Kuid kas võib öelda, et see on võimatu? Muidugi mitte. Viimase kümne aasta jooksul tekkisid uue muusika — elektrimuusika — entusiastid. Nad valmistasid palju muusikariistu, mis annavad suurepäraseid, senitundmatuid helisid. Tekkivaid elektrilisi võnkumisi muundatakse ja võimendatakse raadiolampides. Seepärast on kõigil elektrimuusikariistadel ka lampraadiovastuvõtjatele omased puudused: nad on lühikese eaga, rasked ja suured. Näiteks kaalub ühehäälnu muusikariist emiriton 90 kilogrammi. Liiga palju!

Nüüd hakkasid elektrimuusika entusiastid kasu-

tama pooljuhte. Ehitati esimene elektriorel kristallgeneraatorite ja -võimendajatega. Möödub mõni aasta ja meie majades, parkides ja tänavatel hakkavad helisema imetoredad elektrilised trompetid, kellad ja keelpillid. Heliloojad hakkavad looma mitte ainult partituure, vaid ka uusi tämbreid. Ilmuvad kerged ja töökindlad elektrimuusikariistad, mis on kättesaadavad igaühele ega nõua mitmeaastast õppimist.

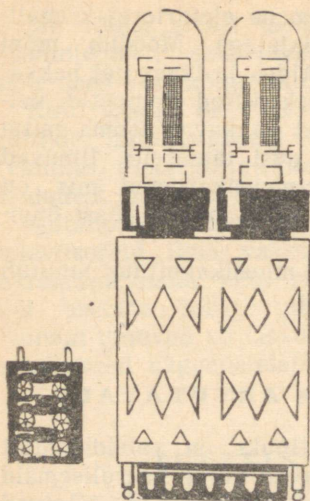
Teaduse poolt rikastatud muusikakultuur muutub rahvale veelgi lähedasemaks.

KRISTALLID, MIS ARVUTAVAD

Tänapäeva elektroonika tipuks on vaieldamatult arvutusseadmed. Nad teostavad kõige keerulisemaid matemaatilisi arvutusi, juhivad masinaid, tõlgivad teksti ühest keelest teise ja lahendavad maleülesandeid. Inimene annab masinale «ülesande» ja viimane täidab hiiglasliku arvutusliku töö mõne tunni või isegi mõne minuti jooksul — töö, mida sajad inimesed oleksid teinud mitu aastat.

Elektronarvutusmasinad on väga keerulised ja suured. Nad hõlmavad hiiglasuuri saale, sageli terveid hooneid. Igaühes neis on tuhandeid raadiolampe. Kerge on mõista, missuguse suurepärase efekti annab siin pooljuhtide kasutamine. Kristallide baasil ehitatud arvutusmasin nõuab mitu korda vähem ruumi, on palju kergem ja ökonoomsem, kuid peamine on see, et ta on palju töökindlam. Kolme-millimeetrine ferriitrõngake, mis on läbi lõigatud mõne peene traadiga, võib asendada arvutusmasinas korraga paari raadiolampi ja veel mõnda detaili. Teist tüüpi ferriitidel on tähtis osa elektronarvutusmasina omapärastes mäluseadmetes.

Vaakuumlampide arvutus-
masina üks sõlmedest. Va-
sakul — sama sõlm ferriit-
detailidest.



Kahtlemata ilmuvad tulevikus väikesed pooljuht-
arvutusmasinad ja võib-olla isegi taskuarvutusmasi-
nad. Need kujunevad originaalseks mitmekülgseks
mehhaniseerimisvahendiks mitte üksnes füüsilise,
vaid ka vaimse töö tegijatele.

Elektronarvutustehnika on abiks meteoroloogidele
ja me saame täpseid ilmastikuprognose. Raamatupi-
dajad, raamatukoguhoidjad ja dispetšerid teevad
masinale ülesandeks arvutada mitmesuguseid kata-
looge, koondtabeleid, plaane ja teostada statistilisi
arvutusi.

Valgusfooriga ühendatud arvutusmasin hakkab
reguleerima tänavaliiklust.

On tehtud esimesi katseid juhtida lennukite liiku-
mist maa pealt. Vastavalt arvutusmasina käsule len-
nuk stardib, tõuseb õhku, manööverdab ja maandub

vajalikku kohta. See suurepärane automaatika jätab kaugele maha «nägeva» auto teaduslik-fantastilisest jutustusest.

Tööstuses hakkavad elektronseadmed juhtima tsehhe ja terveid tehaseid. Inimene sunnib neid välja andma toormaterjali, kontrollima ja muutma tehnoloogiat, sorteerima ja üle lugema produktiooni. Kõikjal hakkavad häireteta töötama pooljuhid.

TULEVIKULE VASTU

Meie aega nimetatakse aatomisajandiks. See on õigustatud nimetus, kuid mitte täiesti. Planeedi ümberkujundamine inimkonna soovide järgi on seotud paljude suurte teaduse võitudega. Siin on nii tuumafüüsika saavutused, kui ka elektroonika tormiline areng, pooljuhtidefüüsika progress ja keemia hämmastav edu, samuti ka energaetika, metallurgia, masinaehituse, ehituse ja põllumajanduse võimas ja tark tehnika.

Õpetus pooljuhtidest areneb koos teaduse ja tööstuse kõigi tähtsamate harude arenguga, tuginedes nende mitmeaastastele kogemustele.

Pooljuhtidefüüsika rikastab omakorda naaberharusid teaduses ja tehnikas.

Näiteks selgus, et pooljuhtmaterjalid on suurepärased katalüsaatorid — keemiliste protsesside kiirendajad. Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia korrespondeeriv liige S. Z. Roginski märkis ühel teaduslikul konverentsil, et alles hiljuti oli keemia samasuguses olukorras nagu «väikekodanlane» aadlikkonna hulgas. Molière'i kangeline ei kahelnud, et ta kogu elu räägib proosas, aga keemikud ei teadnud, et paljudes keemilistes protsessides on tegemist pooljuhtidega ja elektroonsete protsessidega pooljuhtides.

Aparaadiehituses peab juurutama veel üht pooljuhtide iseärasust — tema elektrivoolu nihet välise magnetivälja mõjul. Sellel põhimõttel võib luua enneolematult tundlikke ja täpseid kompasid, ehitada aparate, mis suudavad kinni püüda esemete asukoha muutusi kümnemiljondiku millimeetrise täpsusega!

Pooljuhtidefüüsika kohtus ka selle teadusharu jaoks nii ootamatu alaga, nagu seda on füsioloogia. Selgus, et ka siin on elektroonsetel nähtustel suur osa. Ungari füsioloog E. Ernst märkas hiljuti, et terve rida närviprotsesside iseloomustavaid omadusi saab lihtsalt seletada, oletades, et mõned närvid struktuurilised kujundused on omapärased pooljuhtalaldajad. Kes teab, võib-olla kirurgid, kasutades mingit senitundmatut pooljuhti, õpivad valmistama kunstlikke närve!

Vähe on uuritud ka pooljuhtmaterjalide mehhaanilisi omadusi. Muuseas on selliste uurimuste tööpõld väga lai ja tänuväärne. Mõned pooljuhid on erakordselt kuumuskindlad — nad taluvad temperatuuri üle 4000 kraadi! Võib-olla valmistatakse neist materjalidest kunagi planeetidevaheliste laevade mootorite põlemiskambreid, aatomseadmete varustust.

Tänapäeva pooljuhtidefüüsika kergitas meie eesnurgakese eesriidest, mis varjab homset päeva. Kuid läbi selle pilu me nägime siiski palju. Homse päeva linnas kohtasime me hooneid, mida köeti külmaga, kõrbetes nägime me imeväärseid kiirgusenergiapüüdjaid. Me ennustasime päikese energieetika sündi. Me nägime uue raadiotehnika laialdast levikut, miniatuursete nägevate ja mäluga masinate võidukäiku ja kuulsime enneolematute muusikainstrumentide helisid.

Need on killukesed meie tulevikust, kuid saavutada neid pole kerge. Tuleb veel üle saada tuhan-

detest suurtest ja väikestest takistustest, edasi arendada mitte üksnes kristallpooljuhtide, vaid ka klaasiliste ja vedelikpooljuhtide teooriat. Tuleb leida parimad teed nende puhastamiseks ja töötlemiseks.

Vanim nõukogude teadlane, sotsialistliku töö kangeline, akadeemik A. F. Joffe, kes pühendas rohkem kui veerand sajandit pooljuhtidefüüsikale, ütleb: «Me astume tehnika progressi uude ajastusse. Meil on küllalt jõudu ja võimalusi, nii moraalseid kui ka materiaalseid, selleks et lähematel aastatel või aastakümnetel lahendada igasuguses mastaabis ülesandeid.»

Nõukogudemaa teadlased ja insenerid vaatavad kindlalt tulevikku. Inimesed julgete mõtetega, selge mõistusega, väsimatud teaduse entusiastid räägivad täna sellest, mis homme saab rahva ühisvaraks, sellest, mis kuulub kommunismisajanditesse.

SISUKORD

Sissejuhatuse asemel	3
Elektrijuhtivuse saladused	
Aatomid	7
Elektronid metallis ja isolaatoris	8
Esimene tutvus	11
Tühi tool	12
Nagu teatris	13
Kaks voolu	15
Kujuteldav osake	16
Aatomid — külalised	17
Elektronide püüdjad	19
Originaalsest teoriast	20
Pooljuhtide saamine	21
Termomeetri asemel	
Kraadiklaas on vananenud	27
Tuhat mõõtmist	28
Tundlik nõel	31
Tuhandekraadises kuumuses	33
Temperatuuri mõõtmine kaugusest	34
Suurepärane bolomeeter	35
Puhangu jõud	37
Missuguses järjekorras hakkavad mootorid tööle	38
Kõrgahju hingus	39
Soojuse püüdmise	
Metsaonnikeses	43
Uus omadus	44
Krae saladus	46

Unistus täitub	49
Säästke soojust	51
Energia maapõuest	53
Elektroonne külm	54
Mootorita külmutuskapp	55
Pahupidi pööratud külmutuskapp	57
Kunstlik kliima	58

Masinaid, mis näevad

Auto silmad	65
Valgusega tulistamine	66
«Klaassilm»	67
Unustatud avastus	68
Materjalid, mis näevad	69
Tehaste tsehvides	70
Hoolikas press	72
Valguse teatejooks	73
Masinaid, mis loevad	74

Aparaadid, mis näevad

Suurepärane peeglike	79
Elektronidest piirivalvurid	80
Automaatne laborant	81
Kirurgi abiline	83
Kuul süüdatud tuletikk	84
Kiir juhtme asemele	86

Kinnipüütud kiired

Varahommikul	91
Päikeseplatari	92
Päikese energetika	93
Päikesekiir töötab	95
Päikesekiir ja puuleht	98
Päikese uued annid	99
«Tagavaraks» kogutud valgus	101

Elektroonika kristallides

Õnnetu ostja	107
Esimene samm	108
Detektor töötab	110
Oleg Lossevi leiutis	112
Raadiolamp töötab	114

Triumpf ja kriis	116
Milleks on vajalik tühjus	117
Ennustatud aine	118
Pooljuhtvõimendaja	119
Teed kristallidele	121
Tootmine mikroskoobi all	124
Uued ülesanded	126
Keraamilised magnetid	128
Kristallide toitmine	130
Mikroraadiotehnika	132
Raadiojaam pallis	134
Tuleviku muusika	136
Kristallid, mis arvutavad	137
Tulevikule vastu	139

Анфилов Глеб Борисович

ЧТО ТАКОЕ ПОЛУПРОВОДНИК

На эстонском языке

Оформление В. Варе

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

*

Toimetaja H. Korpmann. Kunstiline toimetaja I. Torn.
Tehniline toimetaja L. Uuspõld. Korrektorid L. Golberg
ja I. Tamm.

Ladumisele antud 4. IV 1960. Trükkimisele antud 20. VI 1960.
Paber 70×92, 1/32. Trükipoognaid 4,5. Formaadile 60×92
kohaldatud trükipoognaid 5,27. Arvutuspoognaid 5,11. Trüki-
arv 6000. Tellimise nr. 3629.

Hans Heidemanni nimeline trükikoda. Tartu, Ülikooli 17/19.

Hind rbl. 2.55

Rbl. 2.55

A-23253

III

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00354678 7