

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

U. Nõmm
P. Lõuk

ÕPPEMATERJALE

insener-tehniliste töötajate
täienduskursustest
osavõtjaille

TARTU 1961

A-24175v

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOI

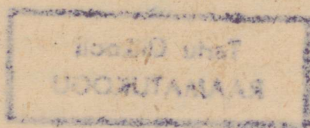
EKSPERIMENTAALFÜÜSIKA KATEEDER

U. Nõmm

P. Lõuk

ÕPPEMATERJALE

insener-tehniliste töötajate
täienduskursustest
osavõtjatele



TARTU 1961

Sh

Тартуский государственный университет
ЭССР, г. Тарту; ул. Кликкооли, 18
У. Нымм и П. Лыук

УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО КУРСУ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА

На эстонском языке

N

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
70952

2

Tartu Ülikooli
RAAMATUKOGU

190390

Vastutavad toimetajad U. Nõmm ja A. Haav
Korrektor E. Oja

=====

TRÜ rotaprint 1961. Trükipoognaid 3,25.
Tir. 200 eks. MB 08124. Tell. nr. 607.

Tasuta

E E S S Ö N A .

Käesoleva kirjutise piiratud maht tingis ainult valitud materjali kokkusurutud esituse. Materjali püüti valida nii, et see annaks esmakordsel kokkupuutel vaakuumtehnikaga minimaalselt vajaliku ettekujutuse ainekst ning stimuleeriks vaakuumi rakendamisele. Vaakuumi kasutatakse edukalt mitmesugustel aparadihituse, metallurgia ja keemiatööstuse aladel. See on tinginud selle, et viimastel aastatel on ilmunud terve rida suurepäraseid monograafiaid vaakuumtehnika teoreetiliste aluste, rakendamise ja vaakumsüsteemide konstrueerimise kohta. Need teosed (vt. kirjanduse loetelu) rahuldavad ka kõige teadmistejanulisema nõuded.

Kuigi kõigis loetletud teostes on käsitletud enam-vähem kõiki vaakuumtehnika aspekte, on neis siiski olulisi erinevusi materjali raskuspunkti asetuses. Hästi on kirjutatud Groszkowski raamat / 1 /, mis haarab kõiki vaakuumtehnika lõike. Analoogiline materjali esitus on ka Korolevi / 2 / raamatus, kuid see on kirjutatud keskharidusega lugejale.

Põhjalikke teoreetiliselt põhjendatud ja praktiliseks kasutamiseks mõeldud teadmisi vaakuumtehnika ja tema kasutamise alustest pakub Heinze monograafia / 6 /, millest 1960. a. ilmumise esimene osa. Selle neljandas peatükis leiab lugeja vajalike andmeid metallide, õlide ja teiste ainete aurustumise, vaakuumdestilleerimise jm. kohta, mis on esitatud hulgaliste valemite, tabelite ja graafikute näol ning mis soodustavad orienteerumist selles nii aparadihituses kui ka keemiatööstuses olulises vaakuumtehnika kasutamise lõigus.

Edasi on põhjalikult käsitletud gaaside adsorptsiooni, absorptsiooni, okludeerumise ning metallide oksüdeerumise ja taandamisega seotud nähtusi - need on eriti olulised staati-

liste vaakuumüsteemide korral (näit.raadiolambid jt.).

Vaakuumsüsteemide konstrueerimisele ei ole soovitatav asuda enne põhjalikku tutvumist Danilini raamatuga / 5 /. See on kirjutatud väga konkreetselt ning varustatud paljude tabelite ja joonistega vaakumpumpade, torude, lõksude¹, ventillide, kraanide, tihendite jne. kohta, milliste andmete käepärasus lihtsustab nii metallist kui klaasist vaakuumüsteemide ehitamist.

Lõigus, kus käsitletakse metallide keevitamise ja jootmise teel ühendamist, aga ka metallide ühendamist klaasiga, on näidatud raskused, millele võidakse mitteasjatundlikul lähenemisel sattuda.

Raamatu lõpus esitatakse terve peatüki ulatuses konkreetseid juhiseid vaakuumüsteemide konstrueerimiseks. Samalaadse kallakuga on ka Guthrie ja Wakerlingi / 4 / raamat, kust samuti võib saada vaakuumüsteemide konstrueerimiseks häid näpunäiteid, kuid peamine osa neist on esitatud ka hiljem ilmunud Danilini raamatus.

Võib kinnitada, et kui on kasutada rotatsioon- (BH-494, BH-461, PBH-20) difusioonpump (MM-40, ЦБЖ-100, H-1C) ning mehhaanikatöökoja abi, siis ei ole metallist kõrgvaakuumsüsteemi ($p \sim 10^{-5}$ mm Hg) ehitamiseks muid takistusi kui pealehakkamise puudus.

¹ Lõksuks nimetatakse vaakuumüsteemis tavaliselt pumba ja evakueeritava ruumi vahel asuvat seadet aurude ja niiskuse kinnipüüdmiseks, mis töötavad kas kondensatsiooni (madal temperatuur) või adsorptsiooni (näit.aktiivsüsi) põhimõttel.

I. SISSEJUHATUS.

Vaakuumtehnika tegeleb vaakuumi saamise, säilitamise ja mõõtmisega. Siia kuulub ka vastavate seadmete (süsteemide) konstrueerimine.

Vaakuumiks nimetatakse ruumi olekut, kui see on täidetud gaaside või aurudega rõhkudel, mis on tunduvalt madalamad atmosfäärilisest.

Vaakuumi saamiseks tuleb evakueeritavast ruumist kiiresti ja kindlalt eemaldada gaasid ja aured. Seda teostatakse tavaliselt vaakuumseadmete (pumpade) abil, aga mõnikord ka mõnel muul teel. Vaakuumi säilitamiseks tihendatakse anuma seinad ja puhastatakse hoolikalt vaakuumiga kokkupuutuvad pinnad, aga kasutatakse ka (staatilistes süsteemides - raadiolambid jne.) eralduvaid gaase neelavaid aineid (getter).

Rõhkude mõõtmine atmosfäärirõhust kuni rõpuni 10^{-11} torri (mmHg) (st. kuni 14 suurusjärku), pumpamise kiiruse mõõtmine, leki avastamine jne. on vaakuummõõtmiste ala.

Vaakuumseadmetes on vajalik abiaparatuur - torud, balloonid, lõksud, ventiilid, kraanid, tihendid jms.

II. GAASIDE OMADUSED SÕLTUVALT VAAKUUMI ASTMEST.

Vaakuumi saavutamise seotud nähtuste mõistmine ei ole võimalik ilma gaaside voolamise ja ainete aurustumise ja kondenseerimise iseärasusi tundmata.

Ideaalne vaakumpump oleks lõplike mõõtetega auk (lõpmata) suurde tühja ruumi. Siit selgub, et vaakumpumba tegevus on passiivset laadi - pump peab ainult kindlustama, et kord oma korrapäratul soojuslikul liikumisel temasse sattunud gaasi molekulid ei pääseks enam tagasi. Vähjendatakse küll sageli: pump "tõmbab",

kuid tegelikult tõmmet kui niisugust ei ole ja pump "tõmbab" ainult niivõrd, kui võrd gaasi molekulid suudavad kõiki takistusi (torud, avad, kõverused, jahutatud kohad, kraanid jne.) ületades oma soojuslikul liikumisel sattuda pumba. See "lõikab ära" nende tagasitee.

Ärapumbatava gaasi "kogust" iseloomustavad kaks suurust: 1) gaasi ruumala V , 2) gaasi hulk $Q = p \cdot V$, kus p on gaasi rõhk.

Oma soojuslikus liikumises pörkuvad gaasi osakesed nii anuma (toru) seintega kui ka omavahel. Keskmine kaugus, mille molekul läbib kahe omavahelise pörke vahel, on saanud nime-tuse keskmine vaba tee λ .

Paljud gaasi omadused ja nähtused, mis toimuvad gaasilises keskkonnas, muutuvad sõltuvalt λ ja evakueeritava anuma lineaarmõõdete d suhtest.

Vaakuumtehnikas nimetatakse gaasi olekut, kui $\lambda \gg d$, kõrgvaakuumiks. Seega on "kõrgvaakuum" suhteline mõiste, mille määrab λ ja d vahekord.

Olekut, kus $\lambda \ll d$, nimetatakse madalaks vaakuumiks ning vahepealset, kus $\lambda \approx d$, - keskmiseks vaakuumiks.

Madala vaakuumi korral pörkuvad gaasi molekulid peamiselt omavahel, samuti on aurumise kiirus väike (aurustunud molekul pöördub gaasi molekulidega pörkudes tagasi); gaasid difundeeruvad üksteises aeglaselt; gaasi soojusjuhtivus ja sisehõrdumine ei sõltu rõhust.

Kõrgvaakuumi korral ($\lambda \gg d$) lendavad gaasi molekulid sirgjooneliselt anuma seinte vahel; molekulid liiguvad üksteisest täiesti sõltumatult - ei pörku üksteisega; aurumise kiirus saavutab antud temperatuuril maksimaalse võimaliku väärtuse ning aurumine toimub molekulaarse joana (molekulid pörkuvad lõpuks anuma seina või ettepanud tõkkega - vaakuumaaurustamine!!); vastastikune difusioon toimub silmapilkselt; gaasi soojusjuhtivus on võrdeline rõhuga (seda nähtust kasutatakse soojuslikes manomeetrites rõhu mõõtmiseks). Kõrgvaakuumis ei saa kõnelda sisehõrdumisest, küll aga on molekulid vahetud liikumise hulga edasikandjad kahe üksteise suhtes erineva kiirusega liikuva pinna vahel.

III. VAAKUUMPUMPADE PÕHIKARAKTERISTIKUD.

Üldiselt saavutatakse vaakuum vaakumpumpade abil, mis on mingi toru või vähemalt ava abil ühendatud evakueeritava ruumiga.

Vaakuumpumpi iseloomustavad järgmised parameetrid.

Algrõhk on rõhk, mis peab esialgu olema evakueeritavas ruumis selleks, et pump võiks hakata tööle. Rotatsioonpumbad hakkavad tööle juba alates atmosfäärirõhust. Difusioonpumbad vajavad nn. eelvaakuumi $l = 0,05$ torri sõltuvalt tüübist.

Maksimaalsest väljumisrõhust kõrgemal rõhul väljumisavas katkeb pumba töö.

Maksimaalne väljumisrõhk on tavaliselt antud pumba passis.

Piirrõhk (piirvaakuum) on antud pumbaga saavutatav minimaalne rõhk kestval pumpamisel ilma lekita ja gaasi mitteeraldavas süsteemis. Rotatsioonpumpadel on see $10^{-2} - 10^{-3}$ torri, elavhõbeda difusioonpumbal (ilma lõksuta) 10^{-3} ja õli-difusioonpumpadel $10^{-6} - 10^{-7}$ torri.

Vaakuumpumpade parameetritest saab ettekujutuse nn. pumpamise kõveratest, kus esitatakse rõhu muutus evakueeritavas ruumis sõltuvalt ajast ($p = f(t)$).

Pumpamise kiirus S on gaasi ruumala, mis ajaühikus antud rõhul siseneb sisenemistorust pumba ($S = \frac{Q}{p \cdot t}$). S sõltub rõhust nii rotatsioon- kui ka difusioonpumpadel. Juhendites antakse pumba S kas kindla rõhu jaoks või tema maksimaalne väärtus.

Rotatsioonpumpadel on S väärtus mõned l/sec . Tuleb silmas pidada, et suure rõhu tõttu ei pruugi evakueeritava gaasi hulk ($Q = p \cdot S \cdot t$) olla väike.

Difusioonpumpadel on S mõnekümnest kuni mitme tuhande l/sec . Kuna töö rõhk on tavaliselt $10^{-4} - 10^{-5}$ torri, siis jääb eemaldatava gaasi hulk suhteliselt väikeseks.

Rotatsioon- ja difusioonpumpade koostööl peab rotatsioonpump ka kõige halvemates tingimustes olema suuteline eemaldama kogu difusioonpumba väljundist temasse sattuva gaasi, s. t.

$$P_{\text{rot}} \cdot S_{\text{rot}} \geq P_{\text{dif}} \cdot S_{\text{dif}}$$

Pumpade kasutamisel tuleb muidugi silmas pidada ka tehnilisi parameetreid - vajalik võimsus, tiirude arv, töövedeliku hulk, gabariidid, astmete arv jne.

IV. TORUDE JA AVADE JUHTIVUS NING VAAKUUM-TEHNIKA PÕHIVÕRRAND.

Gaasi eemaldamisel pumba abil suundub gaas torude ja avade kaudu evakueeritavast ruumist pumba. Need vahelülid - avad, lõpliku pikkuse ja läbimõõduga torud - takistavad gaasi voolamist. Selgub nimelt, et ka kõige paremal juhul (antud rõhul ja temperatuuril) ei saa toru läbida rohkem gaasi, kui seda lubab tema juhtivus. Torusid ja avasid iseloomustataksegi kas nende juhtivuse U või selle pöördväärtuse - takistuse W kaudu. Toru juhtivus sõltub üldiselt rõhust.¹ Madala vaakuumi puhul ($\lambda \ll d$) on gaasi voolamise iseloom erinev voolamisest kõrgvaakuumi olekus ($\lambda \gg d$). Madala vaakuumi korral on gaasi molekulid kogu aeg omavahelises põrkumises ja väljumisava juurde sattunud molekulid paisatakse tagapool olevate molekulide poolt edasi rõhu languse suunas. Sellisel juhul (viskoosne voolamine $\frac{\lambda}{d} \leq 10^{-3}$) avaldub toru juhtivus U_v (õhk 20°C juures) järgmiselt:

$$U_v = 188 \cdot \frac{d^4}{L} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2} \text{ l/sec} \quad / 1 /$$

ning ava juhtivus

$$U_{AV} = 20 \frac{A}{1 - \frac{p_2}{p_1}} \text{ l/sec}, \quad / 2 /$$

kus A -ava pindala cm^2 , p_1 ja p_2 -rõhk torrides ning d ja L - toru läbimõõt ja pikkus sentimeetrites.

Kõrgvaakuumi olukorras toimuvat gaaside voolamist nimetatakse molekulaarseks. Siin võib molekul ainult täiesti juhuslikult sattuda väljumisavasse (pumba sisenemisavasse) oma korrapäratul eksleval teekonnal toru (anuma) seinte vahel. Või-¹Kõrgvaakuumi olekus lakkab (molekulaarne voolamine) sõltuvus rõhust.

malus molekulil sattuda väljumisavasse ei ole millegagi eelistatud teiste suundade ees. Kõik molekulid on üksteisest sõltumatud.

Toru juhtivus molekulaarsel voolamisel ($\frac{\lambda}{d} \geq 1,5$)

$$U_M = 12,1 \cdot \frac{d^3}{L} \quad 1/\text{sec} \quad / 3 /$$

ja ava jaoks

$$U_{AM} = 11,6 \cdot A \quad 1/\text{sec} \quad , \quad / 4 /$$

kus tähised on endised. Siin ei sõltu juhtivus rõhust.

Valem vahepealse juhu jaoks (keskmine vaakuum)

$$U_{M/V} = 12,1 \cdot \frac{d^3}{L} (0,9 + 15,6 \cdot d \cdot \frac{p^1 + p^2}{2}) 1/\text{sec} \quad / 5 /$$

kõlbab üldiselt.

Mitme erinevast osast koosneva torusüsteemi takistus ($W = \frac{1}{U}$) on võrdne osade takistuste summaga

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n \quad (\text{sec}/l; \text{sec}/\text{cm}^3; \text{sec}/\text{m}^3)$$

ja kogujuhtivus $U = \frac{1}{W} \quad (1/\text{sec}; \text{cm}^3/\text{sec}; \text{m}^3/\text{sec})$.

Eespool selgitasime, et ideaalseim vaakumpump on auk, mis viib absoluutselt tühja ruumi. Seda "auku" iseloomustab samuti juhtivus ja takistus, aga niivõrd, kui kõneleme pumpast, siis iseloomustab teda samuti pumpamise kiirus $S \quad (1/\text{sec})$, mis on võrdne augu juhtivusega ($U = S$), kuna $W = \frac{1}{S}$.

Vaakuumsüsteemide konstrueerimisel kõrvuti materjalide valikuga torude, vahelülide, tihendite jm. jaoks ning nende õige paigutuse ja tihendusega tuleb püüda saavutada objekti (anuma) võimalikult suur tühjaks pumpamise kiirus (olemasolevate vahendite piirides).

Eespoolt selgus, et pump ise on tegelikult takistus gaasi voolamisele (W_p) analoogiliselt torude ja avadega.

Difusioonpumpadel ongi pumpamise kiirus ligikaudu määratud (võrdne) pumba sisenemisava juhtivusega - võrdeline tema kasuliku pindalaga.

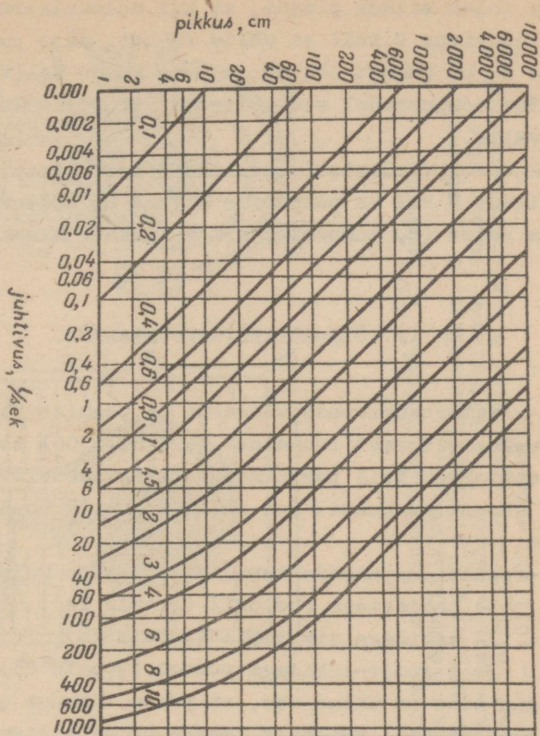
Teades pumba pumpamiskiirust S_p ja ühendustorude süsteemi juhtivust U , saab arvutada nn. vaakuumtehnika põhivõrrandist anuma tühjaks pumpamise kiiruse S_0 :

$$W = \frac{1}{S_0} = W_p + W_{\text{toru}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{U}, \text{ kust}$$

$$S_0 = \frac{S_p \cdot U}{S_p + U}, \text{ v\o oi } S_0 = \frac{S_p}{1 + \frac{S_p}{U}}, \text{ v\o oi } S_0 = \frac{U}{\frac{U}{S_p} + 1}. / 7 /$$

Siit n\ae me, et kui h\ae sti ka ei oleks vaakums\ae steem konstrueeritud, ei saa objekti t\ue hjaks pumpamise kiirus olla suurem pumba pumpamise kiirusest ($S_0 = S_p$, siis kui $U \rightarrow \infty$), s.t. kui pump on vahetult v\o oi v\ae ga j\ae meda ja l\ue hikese toru abil \ue hendatud anumaga.

Samuti j\ae rel dub siit, et kui $U \ll S_p$, siis ei s\o ltu t\ue hjaks pumpamise kiirus S_0 pumba pumpamise kiirusest, vaid on piiratud t\ae lielikult ja ainult torude s\ae steemi takistusega (juhtivusega) ja $S_0 = U$. Sel juhul ei aita suurema t\ue hjaks pumpamise kiiruse saavutamiseks \ue ldse mitte suurema pumpamise kiirusega pumba kasutamisest, vaid seda saab teha ainult torus\ae steemi juhtivuse suurendamisega (st. ilma kitsaskohtadeta j\ae medamaid torusid kasutades).



Joon.1. Silindriliste torude juhtivus sõltuvalt toru pikkusest. Kõverate juures olevad arvud tähendavad toru diameetrit cm-tes.

Joonisel 1 on esitatud graafikuna mitmesuguse diameetri-ga silindriliste torude juhtivus U (molekulaarne voolamine) liitrites sekundis õhu jaoks 20°C juures sõltuvalt toru pikkusest.

Esitame siinkohal veel seose, mis kirjeldab pumpamise aega sõltuvalt evakueeritava anuma ruumalast (V), keskmisest pumpamise kiirusest S_0 ning alg- ja lõpprõhkude (p_1 ja p_2) suhtest:

$$t = 2,3 \cdot \frac{V}{S_0} \lg \frac{p_1}{p_2} \quad (\text{sec}). \quad / 8 /$$

Siin tuleb silmas pidada, et kui molekulaarsel voolamisel toru juhtivus U küll ei sõltu rõhust, siis pumba pumpamise kiirus S_p on rõhust sõltuv ja tema kaudu ka (vt.val.7), kuigi difusioonpumpadel see sõltuvus rõhust on laias rõhu vahemikus väike.

Viskoosel voolamisel on olukord keerulisem, sest nii toru juhtivus U kui ka pumpamise kiirus S_p sõltuvad tugevasti rõhust ja valem (8) pumpamise aja kalkuleerimiseks ei kehti.

V. ÕLI-ROTATSIOONPUMPADEST.

Õli-rotatsioonpumpade ülesanne on peamise õhu hulga eemaldamine evakueeritavast ruumalast ja 0,01-0,001 torrilise hõreduse saavutamine. Neid pumpi kasutatakse iseseisvalt, kui ei ole vaja kõrget vaakuumi. Nad on eelvaakuumpabad difusioonpumpadele.

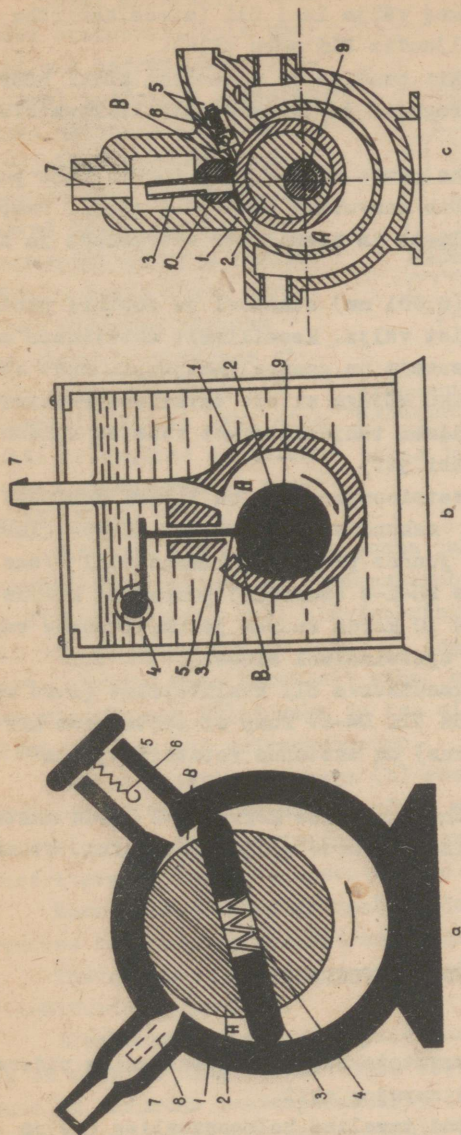
Õli-rotatsioonpumpade tavalisi liike on kolm:

- 1) labidatega rootoril (joonis 2a),
- 2) labidaga staatoril (joonis 2b),
- 3) šarniir-labidaga pumbad (joonis 2c).

Kõigis neis on ühine see, et pumba tööruum jaotub labidate) ja rootori abil vähemalt kaheks hermeetiliselt üksteisest eraldatud osaks (A ja B). Pumba rootori pöörlemisel suureneb A ruumala perioodiliselt, sinna tungib gaas sisenemisavast ja tühjaks pumbatavas ruumalas väheneb rõhk. Tööruumi osa B, mis on ühenduses väljumisklapiga, väheneb perioodiliselt; sinna sattunud õhk surutakse kokku ja "lükatakse" klappiga varustatud väljumisavast välja (klapp takistab välisõhu sissetungimist pumba).

Šarniirpumba korral tuleb tähele panna, et rootor koos järgalt seatud labidaga ei pöörle, vaid rootori kesta ja staatori kokkupuutekoht nihkub võlli ektsentrilisel (rootori suhtes) pöörlemisel rootori "kesta" sees.

Need rotatsioonpumbad on asetatud üleni õlisse (välja arvatud sisenemisava), nii et ka väljumisava jääb õli sisse



Joon.2. Rotatsioonpumbad - a) labidataga rootoril; b) labidaga staatoril ja c) šarniirlabidaga.
 1 - staatori korpus; 2 - silindriiline rootor; 3 - labidas (labidad); 4 - labida vedru; 5 - väljumisava (suubub õlisse); 6 - kiapi vedru; 7 - sisenemisava; 8 - peenest traadist filter; 9 - völli; 10 - šarniir.

ja pumbatav gaas paisatakse välja läbi õli (atmosfäärirõhu korral sisendis tekib väljundis õli auru pilv).

Õlil on kaks eesmärki: peamine on tihendada kõiki hõõrduvaid pindu ja väikseid pragusid ja teiseks olla liikuvatele osadele määrdeks.

Piirvaakuumi saab ühe pumba abil $\sim 10^{-2}$ torri. Kahe pumba järjest lülitamisel võib saavutada kuni 10^{-4} torri. Pump on väga tundlik mehhaaniliste ja keemiliste võõrkehade ja ainete suhtes.

Täpselt poleeritud (0,001 mm) staatori ja rootori pindade riknemine viib pumba rivist välja. Keemiliselt aktiivsete aurude pumpamisel tuleb kasutada nn. gaasballastpumpi, sest kõrvuti nende ainete kahjuliku mõjuga ei ole tavalised rotatsioonpumbad suutelised eraldama tühjentavast ruumist kondenseeruvate ainete auru (vesi jt.).

Pumpamise kiirus rotatsioonpumpadel on liitri murdosadest mõnekümne liitrini sekundis. Kui näiteks BH-494 (labidrad rootoril) on 1 torri juures pumpamise kiirus 0,21 l/sec ja pumba kaal 36 kg, siis BH-1-e (šarniir) pumpamise kiirus on 14,5 l/sec, kaal umbes 10 korda suurem ja käivituseks vajab 3 KW mootorit (kindlasti spetsiaalsel alusel).

Pumpade töö sõltub kasutatava õli kvaliteedist (auru rõhk, viskoossus). Tarvitusel on õli BM-4. Pump ei tööta enam korralikult, kui vesi (niiskus) on sattunud rotatsioonpumpa (õlisse).

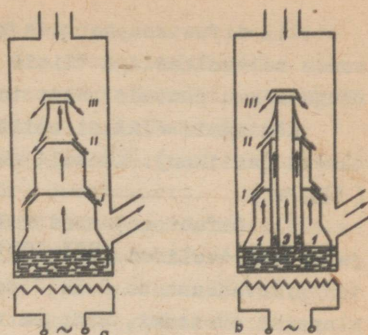
Õli tuleb vahetada õhu pumpamise korral 1-2 korda aastas, keemiliselt aktiivsete ainete juures palju tihedamini, et vähegi pumba säilitada.

VI. DIFUSIOONPUMPADEST.

Difusioonpumpades saavutatakse gaasi eemaldamine pidevalt töötava suunatud (düüsis) aurujoa abil.

Joonisel 3 on esitatud tavalise kolmeastmelise (a) ja fraktsioneeriva (b) difusioonpumba skeem.

Gaasi molekulid, sattudes evakueeritavast ruumist oma korrapäratul liikumisel poolviltu allapoole pumba seintele suunatud aurujukka III, pörkudes raskete auru molekulidega saavad täiendava kiiruse komponendi aurujoka suunas. Rõhk on selle tõttu aurujooast ülalpool väiksem kui allpool, aurujuga ei lase gaasi molekulile alt ülespoole endast läbi ning gaasi molekulide difusioon tagasi evakueeritava ruumi poole ei saa toimuda.



Joon.3. Tavalise (a) ja fraktsioneeriva (b) kolmeastmelise õli difusioonpumba skeem. I, II ja III - vastavalt esimese, teise ja kolmanda astme düüsid.

Aurujuga ise, sattudes pumba jahutatud (tavaliselt vesi-jahutus) välisseintele, kondenseerub ja õli langeb all asuvasse õlireservuaari, kust alustab ringkäiku uuesti. Pidevalt keev õli toidab kõiki (antud juhul 3) jugasid. Jugade selline järjest lülitus, nagu jooniselt näha, on analoogiline difusioonpumpade järjest lülitusega ja iga allpool asuv juga töötab ülemise jaoks kui eelvaakumpump.

Fraktsioneeriva pumbaga (b) saavutatakse, et kõrgvaakuumipoolsesse düüsi satub ainult kõige madalama aururõhuga õli fraktsioon. Sellega välditakse liigne õliaurude tungimine evakueeritavasse ruumi ja saavutatakse parem vaakuum.

Korrapärane aurujuga saab moodustuda ainult küllaldase hõrenduse korral ning sellepärast ongi nõutav eelvaakuum.

Tõõvedelike järgi jagunevad difusioonpumbad elavhõbeda- ja õli-difusioonpumpadeks.

Elavhõbeda-difusioonpumpade kasutamine nõuab ettevaatust - Hg on mürgine ning lisaks vajab veel nn. lõksude kasutamist, kuna Hg aururõhk toatemperatuuril on 10^{-3} torri. Süsteemi materjal peab olema vastupidav Hg-le (Fe, Ni, W, Mo, Ta).

Õli difusioonpumpades kasutatakse madala aururõhu ning suure molekulaaluga õlisid (BM-1 ja BM-2). Kuum õli ei tohi õhuga kokku puutuda, sest ta hapendub.

Mõningaid olulisi eeliseid on räni alusel valmistatud õlidel (silikon). Kuumalt nad ei karda kokkupuutumist õhuga (BKK-94).

Õli difusioonpumpad valmistatakse tavaliselt kahe-(MM-40) ja kolmeastmelised (HBM-100). Õli difusioonpumpadega saavutatav piirvaakuum on $3 \cdot 10^{-6}$ torri. Kui kasutada jahutuslõkse ja klaasist süsteemi, mida on võimalik tihendavalt kuumutada, siis on võimalik saada nende abil hõrendust kuni 10^{-7} - 10^{-8} torri.

Praktiliselt sõltub evakueeritavas ruumis saavutatav vaakuum tunduvalt süsteemi konstruktsioonist ja kasutatavatest materjalidest ning tihendusainetest.

VII. VAAKUUMMÕÕTMISTEST.

Vaakuumi kasutamisel ei saa läbi ilma vaakuumi mõõtmisteta nii vaakuumi astme (rõhu) hindamisel (vaakuummõõtjate täpsus on sageli 20-50%) kui ka teise suure vaakuummõõtmiste ala - leki otsimisel.

Vaakuumi hindamisel kasutatakse sageli hõrendatud gaaside (20-0,01 torri) omadust hakata kõrgepinge mõjul helenduma (ning voolu juhtima). Lihtsam viis on kasutada Tesla induktioonpooli abi - seda muidugi klaasist elemendiga süsteemi korral (klaasist vaakuumpoppel või abitoru). Mida suurem väljatugevus, seda madalamal rõhul veel tekib gaaslahendus. Vaakuumi olekut madalal rõhul (alates 10^{-3} - 10^{-4} torri), kus lahendusnähtusi üldse ei ilmne, nimetatakse pimevaakuumiks.

Tesla induktioonpooli abil teostatud vaakuumi "mõõtmise" täpsusest jätkub, et tabada moment, mil on saavutatud küllaldane alg-(eel-) vaakuum difusioonpumba sisselülitamiseks. Seda võib sisse lülitada siis, kui kogu kuplialune helendub ega ole enam roosa (lämmastik) helenduse jälgi (rõhk on madalam kui 0,1 torri).

Hallikassinakas või sinakas helendus, mis on tavaline peale pikemaajalist pumpamist ja mis muutub tihedamaks kui süsteem (tema osa) hermeetiliselt suletuna omaette seisab, on põhjustatud kas vee või vaakummäärde ja õli aurudest.

Vaakuumi täpseks mõõtmiseks (kuni 10^{-6} torri) kasutatakse Mac-Leodi (kompresioon-manomeeter) manomeetrit.

Levinud on termopaarmanomeetrid (BT-2), kus kasutatakse manomeetrilist lampi JT-2 ja JT-4M. Need koosnevad nn. soojendajast, mida kõetakse ettenähtud (passis antud) vooluga (100 - 140 mA) ning sellega soojuslikus kontaktis olevast termopaarist - kõik klaasist või metallist balloonis. Töö piirkond 1 - 0,001 torri. Alates 1 torrist hakkab gaasi soojujuhtivus rõhu vähenemisel vähenema ja termopaari temperatuur kasvama, millele vastavalt suureneb termopinge, mida registreeritakse rõhu ühikutes gradeeritud millivoltmeetriga. Püsival töötamisel saastub termopaar õli ja aurustatavate ainete tõttu ning tema näit hakkab vähenema.

Ionisatsioonmanomeeter (BM-3) on rõhkude mõõtmiseks 10^{-3} - $5 \cdot 10^{-8}$ torrini. Manomeetri lambi ja trioodi ehituses on palju ühist (trioodi saab kasutada manomeeterlambina). Kuumkatoodilt emiteerunud elektronid kiirendatakse katoodi suhtes positiivse (+200 V) elektroodi (anoodi) abil. Kiired elektronid, pörukudes gaasi molekulidega, ioniseerivad viimaseid. Positiivsed ioniseeritud gaasi molekulid kogutakse nn. kollektorile, mis on anoodi suhtes omakorda negatiivse potentsiaaliga. Ioonvool (väga nõrk!) on võrdeline rõhuga. Töötamisel lubatust (10^{-3} torri) suuremal rõhul rikneb katood ("põleb läbi"). Manomeeter BM-3 on keerulise käsitlusega.

Hõlpus on kasutada vaakuummeetrit BMB-I magnetilise manomeetriga MM-5 rõhkude mõõtmisel 10^{-3} - 10^{-6} torri. Manomeetris MM-5 hoitakse gaaslahendus ka väikestel rõhkudel alles külmelektroodide vahel alalise kõrgpinge (3000 V) ning abimagnetvälja abil. Elektroni tee pikeneb tema liikumisel kõrgpinge väljas magnetvälja toimel ning selle tõttu suureneb kokkupõrke tõenäosus jääkgaasi molekulidega ning nende ioniseerimine.

Vaakuumsüsteemi hermeetilisuse kontroll ning leki otsi-

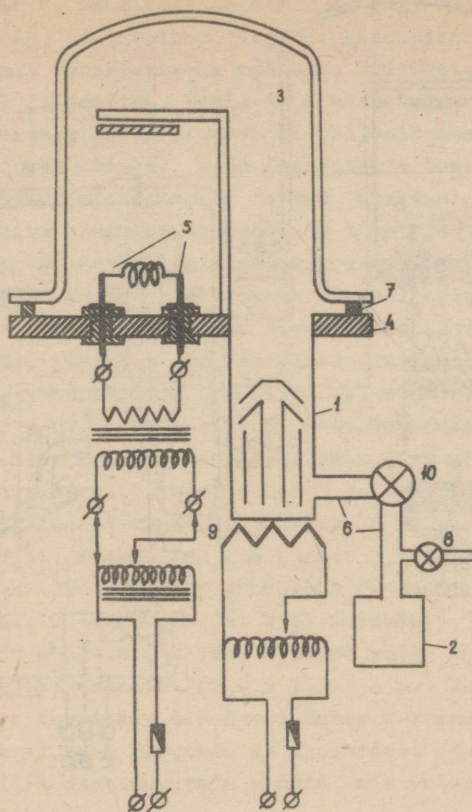
mine on üks sagedamini esinev toiming vaakuumi kasutamisel (eriti siis, kui vaakuumüsteem on lohakalt konstrueeritud, võib "augu" otsimine ning korduv tihendamine minna kallimaks kui uue süsteemi ehitamine või vana kapitaalremont). Selleks on mitmeid viise ja spetsiaalseid seadmeid (leki otsijad ГТМ-2, ПТМ-4А), millest igas vaakuumtehnikaalases raamatus võib leida ülevaate.

Edukalt saab kontrollida süsteemi hermeetilisust ka lihtsat Tesla induksioonpooli kasutades. Tavaliselt on süsteemi üksikud osad ventiilide ja kraanide abil või kummist vaakuumvooliku kinnipigistamise teel üksteisest ja atmosfäärist eraldatavad. Kui pumbata vaakuumüsteem rotatsioonipumba abil tühjaks, siis asendub punakaslilla helendus sinakashalliga, kusjuures lisaks ilmneb klaasi seinte fluorestsents. Isoleerides nüüd süsteemi väliskeskkonnast ja jättes pumba seisma, jälgime pikema aja vältel (10 min., mõni tund, päev) helenduse iseloomu muutust. Võime olla veendunud, et süsteem (või selle osa) ei sisalda (normaalsest suuremat) lekki, kui helendus ka järgmisel päeval jääb sinakashalliks (aja jooksul muutub tihedamaks) ilma punaka varjundita. Mida kiiremini ilmub punakas helendus, seda suurem on lekk.

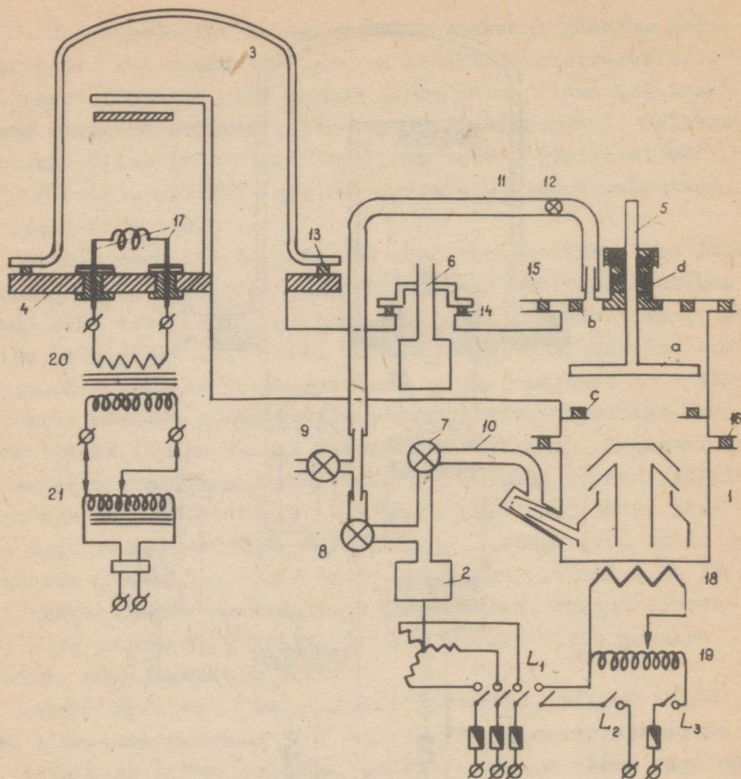
Lihtne arvutus näitab, et kui süsteemis, milles tahetakse saavutada vaakuumi 10^{-4} torri, on juuksekarvajämedune auk, siis peab difusioonipumba pumpamise kiirus olema väga suur ($\sim 2000 \text{ l/sec}$). Seega takistavad kõrgvaakuumi saavutamist juba väga väikesed "augud" süsteemis ning selliste aukude avastamine osutub võimatuks vees või seebikiles teostatud surveproovil (õhumullide tekkimine).

VIII. VAAKUUMAURUSTAMINE.

Praktikumis on ette nähtud tutvumine olemasolevate vaakuumüsteemidega (joonis 4 ja 5), nende hermeetilisuse kontroll (eespool kirjeldatud) ning vaakuumi mõõtmine manomeetriga BT-2, (BM-3 ja BM E-1). Peale tutvumist vaakuumüsteemi-



Joon.4. Lihtne vaakumsüsteem metallide aurustamiseks, kus ei ole võimalust eraldada difusioonpumba tšõruumist.
 1 - difusioonpump; 2 - rotatsioonpump;
 3 - tühjaks pumbatav ruum; 4 - poleeritud metallplaat; 5 - voolukontaktid; 6 - kummist vaakuumvoolik; 7 - kummist tihendusrõngas (O-ring); 8 - õhu sisselaskmise kraan; 9 - difusioonpumba küttemähis; 10 - sulgur.



Joon.5. Vaakuumsüsteem (jahutuslõksu ja ventiliga) metallide aurustamiseks.
 1 - difusioonpump; 2 - rotatsioonpump;
 3 - tühjaks pumbatav ruum; 4 - lihvitud metallplaat; 5 - ventiil (a - ventiili klapp, b,c - kummist tihendusrõngad, d - wilsoni tihend); 6 - metallist jahutuslõks; 7,8,9 - kraanid; 9 - kraan õhu sisselaskmiseks; 10 ja 11 - kummist ühendustoru; 12 - sulgur; 13,14,15,16 - kummist tihendusrõngad (O-ring); 17 - voolu kontaktid; 18 - difusioonpumba küttemähis; 19 - difusioonpumba kütetrafo; 20 - tugevvoolutrafo (50 A 10V); 21 - reguleeritav autotrafo; L₁ - rotatsioonpumba mootori lüliti; L₂ - difusioonpumbalüliti; L₃ - jahutusvee kaitselüliti.

dega ja vaakuumi saamisega saadakse Al (Ag) vaakuumaurustamise teel Al (Ag) pealispinna peeglid (klaasplaadil).

a) Klaasi puhastamiseks pestakse kriimustusteta klaasplaadid lapi ja seebiga. Peale seda asetatakse klaas 6-20 tunniks värskesse kroom-segusse (K (Na)-bikromaat + kontsentreeritud väkvelhape). Siis loputatakse tugevas kraanivee joas ning vajaduse korral jätkub puhastamise operatsioon kontsentreeritud lämmastikhappes 1-2 tunni jooksul. Puhastamine kraaniveega ning täiendav ülevalamine destilleeritud veega, millele otsekohe järgneb klaasi kuivaks hõõrumine puhta kuiva linase käterätikuga. Soovitav on seejärel klaasi kuumutada 160-200°C-ni. Klaasi ei tohi asetada kuuma kappi, kuna sel juhul kondenseerub klaasile niiskus ja tekivad veeplekid.

b) Al-aurustamist teostatakse W-spiraalilt. Kolmekordsest 0,2 mm läbimõõduga W-traadist tehakse 16 cm pikkune keeris (6x9 cm² peegli jaoks). See keeratakse 0,5 cm läbimõõduga pulgal spiraaliks. Soovitav on kuumutada W-traati nende operatsioonide ajal 100-200°C-ni (et W ei murduks!). Iga spiraali keerule ühele jonele (hilisem alumine külg) kinnitatakse puhtast (99,99%) Al-traadist (0,8 x 1,5 x 8 mm) konksud, mis laiokktangidega surutakse tihedasti ümber W-traadi. Kolmekordse W-traadi asemel saab kasutada ka ühekordset jämedamat traati.

Spiraalilt saab aurutada aineid, mis sulanult hoiduvad W-traadi küljes.

Spiraal kinnitatakse vaakuumtaldrikul olevate kontaktide külge. Saavutanud vaakuumi (4-6)x10⁻⁴ torri, teostame esiteks nn. puhastava aurustamise, kuumutades spiraali kuni valkjaspunase helenduseni (autotrafoga juhitava tugevvoolutrafo abil) seni kui enamik Al-tükke sulavad ning liibuvad W-spiraalile. Klaas on sel ajal Al-joa eest kas kaitstud väljast pööratava kattega või ei ole üldse kupli alla asetatud. Esimesel juhul aga jätkame aurustamist otsekohe, eemaldades joa teelt katte. Mida parem on vaakuum, seda kvaliteetsem peegel tekib.

Mida kiiremini (soovitav 3-6 sekundi jooksul) tekib optimaalse paksusega (~ 1000 Å⁰ paksune) peegeldav metalli (Al)

kiht (paistab veidi läbi), seda parem tuleb peegel.

Metallide ja teiste ainete aurustamiseks ettenähtud vaakuumüsteemides peab väljapumpamise kiirus olema mõnekümnest kuni mõnesaja liitrini sekundis. Mida suurem on kupli ruumala ja aurustatava materjali hulk, seda suurem on vajalik pumpamise kiirus.

Soovitav on, et õli aurud ei pääseks kupli alla (kasutada lõkset).

Soovitatakse klaasi puhastamiseks teda nn.ioonpommitada (vt. /8/) või ka kuumutada vaakuumis kupli alla asetatud ahju abil.

Vaakuumaaurustada saab enamikke metalle ja paljusid muid aineid. Põhjalik ülevaade on antud vaakumaaurustamisest Stron-
gi poolt /8/.

KIRJANDUS.

1. ГРОШКОВСКИЙ Я., Технология высокого вакуума, Изд. Иностран. лит., 1957.
2. КОРОЛЕВ В.И., Основы вакуумной техники, Госэнергоиздат, 1958.
3. ЯККЕЛЬ Р., Получение и измерение вакуума, Изд. Иностран. лит., 1952.
4. ГУТРИ А., УОКЕРЛИНГ Р., Вакуумное оборудование и вакуумная техника, Изд. Иностран. лит., 1951.
5. ДАНИЛИН Б.С., Конструирование вакуумных систем, Госэнергоиздат, 1959.
6. ГЕЙНЦЕ В., Введение в вакуумную технику I, Госэнергоиздат, 1960.
7. ЯРВУД Д.Ж., Техник высокого вакуума. Госэнергоиздат, 1960.
8. СТРОНГ А., Практика современной физической лаборатории, Лениздат, 1948.

E E S S Ö N A .

Iga aastaga omandavad pooljuhid üha suuremat tähtsust teaduses, tehnikas ja rahvamajanduses. Käesoleval ajal ei esine ühtegi tehnikaharu, kus ei leiaks kasutamist mitmesugused pooljuhtseadised. Laialdaselt kasutatakse pooljuhtidest fotoelemente, fototakisteid, termoelektrigeneraatoreid, termotakisteid, alaldajaid, diode, trioode, luminofoore jne.

Intensiivne uurimistöö pooljuhtide valdkonnas tagab kahtlematult edaspidi juba kasutusel olevate seadiste kõrgema kvaliteedi võrreldes praegusega, aga samuti ka mitmete uute seadiste kasutuselevõtmise.

Seoses tootmisprotsesside kompleksse mehhaniseerimise ja automatiseerimisega seitsme aasta plaani alusel tõuseb tunduvalt pooljuhtide osatähtsus kõigis rahvamajandusharudes. Pooljuhtide loomingulisel ja otstarbekal juurutamisel tehnikasse ei piisa pooljuhtseadiste karakteristikute formaalsest tundmisest, vaid on vaja teada ka füüsikalisi protsesse, mis on seadiste töö aluseks.

Käesolev kursus seabki ülesandeks tutvustada kursustest osavõtjaid pooljuhtide füüsikaga ulatuses, mis on hädavajalik pooljuhtseadiste töö mõistmiseks. Kuna kursustest osavõtjad on väga erineva ettevalmistusega teoreetilises füüsikas, siis püütakse piirduda materjaliga, mis on mõistetav kõrgemate õppeasutuste üldise füüsika kursuse baasil.

Kursus koosneb 7-st peatükist, mis omakorda on jaotatud alapunktideks. Iga peatüki algul on näidatud kirjandus kogu teema jaoks, kusjuures kõige sobivam õpik on toodud esimesena. Kõigi alapunktide juures on näidatud materjal esimesena toodud õpikust (vajaduse korral ka teistest), mille läbitõttamine on nõutav antud teema omandamisel. Soovitatava õpiku puudumisel võib kasutada teisi peatüki algul toodud õpikuid.

Sel juhul tuleb aga samuti kogu peatüki jaoks näidatud lehekülgede läbitöötamisel pöörata tähelepanu peamiselt peatüki alaküsimustele. Vajaduse korral on programmi punktid täiendatud selgitavate märkustega, mis peaksid aitama lugejal vastava materjali läbitöötamisel tähelepanu pöörata olulisematele momentidele.

I. SISSEJUHATUS.

1. Põhiomadused, mis lubavad suurest hulgast tahketest ainetest eraldada omaette rühma - pooljuhid.

Juba nimetus "pooljuhid" viitab sellele, et oluline osa sellisel rühmitamisel kuulub ainete elektrilistele omadustele. Elektrijuhtivuselt (toatemperatuuril) haaravad pooljuhid laialdase intervalli metallide ja isolaatorite vahel. Metallide eritakistus on suurusjärgus $10^{-6} \Omega \text{cm}$, isolaatoritel aga $10^{10} - 10^{15} \Omega \text{cm}$. Vahepealne piirkond $10^{-5} - 10^{10} \Omega \text{cm}$ kuulub pooljuhtidele ja tahketele elektrolüütidele. Kahe viimase klassi eraldamise määrab ära voolukandjate iseloom. Tahketes elektrolüütides on voolukandjateks ioonid, mille tulemusena elektrolüüdist voolu läbimisel toimub koostisainete eraldumine elektroodidel. Et eraldada pooljuhte elektrolüütidest, kasutatakse sageli nimetust "elektroonsed pooljuhid", kriipsutades sellega alla asjaolu, et pooljuhtides on voolu tekkimise põhjuseks elektronide suunatud liikumine rakendatud välises elektriväljas.

Peale selle on määravaks pooljuhtide eritakistuse sõltuvus temperatuurist. Temperatuuri lähenemisel absoluutsele nullile muutuvad paljud metallid teatavasti ülijuhtivaks, pooljuhid aga muutuvad isolaatoriteks. Temperatuuri tõusuga väheneb eritakistus pooljuhtidel, metallidel aga suureneb. Pooljuhtide eritakistuse vähenemine temperatuuri kasvamisega näitab

et soojusenergia võib olla voolukandjate tekitamise põhjuseks. Niisiis, pooljuhid moodustavad omaette rühma tahkeid aineid järgmiste põhiomadustega:

- 1) eritakistus on toatemperatuuril $10^{-5} - 10^{10} \Omega \text{cm}$;
- 2) absoluutse nulli juures muutuvad nad isolaatoriteks, temperatuuri tõusul aga nende eritakistus väheneb;
- 3) elektrijuhtivuse põhjustajaks pooljuhtides on elektronide (mitte ioonide) suunatud liikumine välises elektriväljas.

Kõik need põhiomadused muutuvad hästi mõistetavaks pärast tutvumist tahke keha tsooniskeemiga.

2. Pooljuhtide koht füüsikas ja tehnikas.

Kirjandus: A.Ф.ИОФФЕ, Физика полупроводников, 1957 г., lk.3-8.

Võib veel kasutada raamatu "Полупроводники в современной физике" esimest väljaannet 1954 г.

Pöörata peatahelepanu 16-le punktile pooljuhtide kasutamise võimaluste kohta.

II. PÕHIMÕISTED POOLJUHTIDE FÜÜSIKAST.

Kirjandus:

- (1) Сборник Полупроводниковая электроника, Государственное Энергетическое Издательство, 1959 г. lk.5-25.
- (2) Полупроводники в науке и технике, т.1, 1957 г. lk.7-46; 49-61.
- (3) Р.Д.Миддлбрук, Введение в теорию транзисторов, lk.47-57
- (4) M.Sominski, Pooljuhid ja nende kasutamine, lk.3-27.

1. Isoleeritud aatomi elektronkate.

- (1) - lk. 5 - 10.

Elektronide liikumise seaduspärasuste tundmine isoleeritud aatomis võimaldab paremini mõista tahke keha elektrilisi omadusi. Seepärast on kasulik meelde tuletada mõningad küsimused isoleeritud aatomi kohta.

- 1) Elektronide liikumine aatomis toimub spetsiifiliste

mikromaailma seaduspärasuste alusel, mis oluliselt erinevad klassikalise mehhaanika seadustest. Mikromaailma seaduspärasused, mida vaadeldakse kvantide mehhaanikas, põhjustavad seda, et elektronidel võivad olla aatomis ainult kindlad diskreetsed energiaväärtused, millele vastavad erinevad elektronide tuuma ümber liikumise orbiidid.

2) Igale diskreetsesele energianivoole vastab kindel elektroni liikumisseisund aatomis. Kõikvõimalikud energianivood moodustavad elektroni nn. energeetilise spektri, mida tavaliselt kujutatakse diagrammina (diskreetsed jooned diagrammil kujutavad elektroni energianivoosid).

3) Elektronide liikumine aatomis allub Pauli printsibiile, mis lubab antud seisundis asuda maksimaalselt kahel elektronil, kui nende spinnid on vastassuunalised.

4) Elektroni seisundi iseloomustamiseks kasutatakse kvantarve.

5) Elemendi valentsi määramisel on olulise tähtsusega välistel orbiitidel asuvate elektronide (nn.valentsielektronide) arv, kuna nad on tuumaga nõrgemini seotud.

6) Kahe aatomi lähendamisel mõjustavad aatomitevahelised elektriväljad peamiselt väliste elektronide liikumist, mille tulemusena moodustuvad keemilised sidemed ja kujunevad molekulid.

7) Aatomis ja molekulis püüavad elektronid jaotuda energianivoode vahel nii, et kogu süsteemi energia oleks minimaalne.

8) Välismõjud võivad põhjustada aatomi energia suurenemise, s.t. ülemineku nn.ergastatud seisundisse. Tagasipöördumisel põhiseisundisse toimub valguse kiirgamine või energia üleandmine teistele aatomitele kokkupõrgete kaudu. Küllalt tugevad välismõjud võivad eemaldada elektroni isoleeritud aatomist, tekitades aatomi ioniseeritud seisundi.

2. Aatomite energianivoode ühinemine tsoonideks aatomitevahelise kauguse vähenemisel.

(1) - lk. 10-14.

(2) - lk. 20-24.

Selle alapunkti juures tuleks tingimata läbi töötada mõlemast õpikust näidatud leheküljed. Juhime lugeja tähelepanu olulisematele asjaoludele.

1) Tänu aatomite lähedusele tahkes kehas tuleks antud elektroni liikumise väljaarvutamiseks arvestada mitte ainult ühe tuuma külgetõmmet, vaid kõigi tuumade ja elektronide vastastikust mõju. See nn. mitme keha probleem on käesoleva aja ni lahendamata, seepärast lahendatakse tahke keha teoorias ülesanne teatud lähendusel. Teoreetilised arvutused näitavad, et aatomitevahelise kauguse vähenemisel nende vastastikuse mõju tõttu moodustuvad tahkes kehas isoleeritud aatomi diskreetsete energianivoode asemel $e n e r g i a v õ r d i d$ $e. t s o o n i d$, mis on üksteisest eraldatud nn. $k e e l u t s o o n i d e g a$. Energiatsoon on grupp üksteisele väga lähedal asuvaid energianivoosid, mille arv vastab aatomite arvule tahkes kehas. Kuna energianivood asuvad tsoonis üksteisele väga lähedal, siis võib tsoonisisese diskreettuse jätta arvestamata ja lugeda, et nivood moodustavad tsooni piirides pideva spektri.

2) Aatomite lähedus tahkes kehas mõjutab põhiliselt väliskihtide elektronide liikumist. Kõrval asuvate aatomite mõju antud aatomi sisekihtide elektronidele võib arvestamata jätta, kuna need elektronid on oma aatomi tuumale tunduvalt lähemal kui ümbritsevate aatomite tuumadele.

3) Tahke keha puhul kehtib samuti nagu isoleeritud aatomi puhulgi Pauli printsiip. Kui aatomite arv tahkes kehas on N , siis võib Pauli printsiibi alusel maksimaalne elektronide arv tsoonis olla $2N$.

4) Oluline on vahe valentsielektroni üleminekul ühelt aatomilt teisele isoleeritud aatomite korral ja aatomilt aatomile kristallis. Esimesel juhul peab elektron ületama potentsiaalse barjääri, mille kõrgus on võrdne aatomi ionisatsioonenergia. Teisel juhul aga (tahkes kehas) lähedal asuvate aatomite vastastikuse mõju tõttu vähenevad potentsiaalsed barjäärid aatomite vahel ja tänu tunnelelektile võivad elektronid vabalt üle minna ühelt aatomilt teisele. Nüüd ei saa enam siduda valentsielektroni konkreetse aatomiga, vaid tuleb vaadel-

da kõigile aatomitele ühist valentselektronide kollektiivi.

5) Kõige kõrgemal asuvat elektronidega asustatud tsooni (0° K juures) nimetatakse valentsstsooniks ehk täidetud tsooniks. Edaspidi kohtumegi tahkete kehade omaduste väljaselgitamisel põhiliselt valentsstsooni ja järgmise kõrgemal asuva tsooniga (energia väärtuste skaalal), mille moodustavad aatomite kõige madalamale ergastatud seisundile vastavad energianivood. Seda tsooni nimetatakse vabaks ehk juhtivustsooniks.

6) Teades elektronide jaotust energianivoode vahel isoleeritud aatomis, võib määrata, kas valentsstsoon on täidetud elektronidega osaliselt või täielikult (0° K juures). Tsoonide täitumisaste aga on määrav tahke keha elektriliste omaduste väljaselgitamisel.

Vaatleme näiteks elektronide jaotust tsoonide vahel (0° K juures) metallis Li ja isolaatoris NaCl. Maksimaalne elektronide arv Li aatomi seisundis ls antakse valemiga $n = 2(2l + 1)$, s.t. $n = 2(2 \cdot 0 + 1) = 2$, kus l-ga tähistatakse orbitaalset kvantarvu. Järelikult kõige madalamas energiatsoonis asub 2N elektroni ja kõik seisundid on täidetud elektronidega. Li aatomis on kolm elektroni, seepärast seisundis 2s asub igas aatomis 1 elektron, kuna teine koht jääb vabaks. Seisundile 2s vastavas tsoonis on seega N elektroni, s.t. Li puhul on valentsstsoon täidetud ainult pooleni (maksimaalne elektronide arv võib olla 2N).

Vaatleme nüüd elektronide jaotust NaCl-s. Na aatomi elektronkate koosneb 11 elektronist, kusjuures elektronide jaotus aatomites antakse valemiga $1 s^2 2 s^2 2 p^6 3 s^1$. Nagu näeme, on Na aatomis 3s seisundis üks vaba koht. Cl aatomis on 17 elektroni, s.t. elektronide jaotus nivoode vahel avaldub valemiga $1 s^2 2 s^2 2 p^6 . 3 s^2 . 3 p^5$. Viimases seisundis 3p on üks vakantne koht elektronile. Na ja Cl aatomite ühinemisel kristalliks annab iga Na aatom kloorile üle elektroni $3s^1$ seisundist. Nüüd on mõlemat tüüpi aatomites kõik madalamad energianivood maksimaalselt täidetud elektronidega, s.t. NaCl kristallis on kõik madalamal asuvad tsoonid, lõpetades valentsstsooniga, täielikult täidetud, juhtivustsoon aga on

tühi.

7) Oluline on mõista, mispärast ei või välise elektrivälja mõjul tekkida elektronide suunatud liikumine (elektrivool) juhul, kui valentstsoon on täielikult täidetud elektronidega. Vastuse sellele küsimusele annab Pauli printsiibi rakendamine. Kui elektronid täidetud tsoonis võiksid liikuda välise elektrivälja mõjul, siis see tähendaks, et võiks muutada nende energia. Teiste sõnadega, elektron läheks üle ühelt energianivoolt (tsooni piires) teisele. Kuna aga kõik energianivood on täidetud elektronidega maksimaalselt, siis Pauli printsiibi alusel ei saa elektroni energia muutuda, s.t. voolu tekkimine pole võimalik. Näiteks NaCl peab olema isolator, kuna tema valentstsoon on täielikult asustatud (täidetud). Seda kinnitab ka praktika.

Teistsugune olukord kujuneb aga elektrivälja rakendamisel metallis (näiteks Li). Nagu eespool näitasime, on Li puhul ainult pool valentstsoonist täidetud. Vabade kohtade olemasolu tõttu võib elektronide energia välise elektrivälja mõjul muutuda (kasvada) ning saab võimalikuks nende ühesuunaline liikumine - elektrivool.

3. Metallide omadused tsooniskeemi alusel.

Kirjandus:

(1) - lk. 14-16.

(3) - lk. 47-49.

Tähelepanu pöörata järgnevale:

1) Metallides on alati valentstsoon täidetud osaliselt, nagu seda nägime juba punkti 2 näidetest (Li ja Na). Tänu sellele võib elektronide energia muutuda tsooni piires ning tekkida elektrivool.

2) Elektronid, mille liikumine elektriväljas on voolu põhjustajaks, kannavad nimetust "vabad elektronid". Metallides on vabade elektronide kontsentratsioon $\sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ega sõltu temperatuurist.

3) Ideaalselt korrapärase kristallvõre puhul on kristallisisesed elektriväljad ideaalselt perioodilised ja vabad elektronid ei leia mingit takistust oma liikumisel välise

elektrivälja mõjul (sellise resultaadi annab teoreetiline arvestus). Takistuse puudumine tähendaks aga seda, et välise elektrivälja mõjul oleks elektronide liikumine ühtlaselt kiirenev ja vool muutuks lõpmatult suureks. Reaalsetes kristallvõredest on vabade elektronide liikumine takistatud. Seda põhjustavad elektronide kokkupõrked põhiaine koosseisu mittekuuluvate aatomitega (nn. lisanditega), elektronide omavahe- lised kokkupõrked, kokkupõrked mitmesuguste kristallvõre defektidega, aga samuti kristallvõre põhiaatomitega, kui viimased asuvad termilise võnkumise seisundis oma tasakaaluasendi suhtes.

Mida vähem on selliseid kokkupõrkeid, seda pikemad on lõigud, mille kestel elektronid välise elektrivälja mõjul liiguvad ühtlaselt kiirenevalt ehk, nagu räägitakse, elektroni vaba tee pikkus on suur. Kogu vabade elektronide kollektiivi iseloomustatakse keskmise liikumise kiirusega paljude vabade tee pikkuste vältel. See on võrdeline väljatugevusega E ja antakse valemiga $v = \mu_n \cdot E$, kus μ_n on elektronide nn. l i i k u v u s.

Kõigis metallides on vabade elektronide arv ligikaudu võrdne ega sõltu temperatuurist. Metallide eritakistuse suurenemist temperatuuri tõusuga, millest oli juttu sissejuhatuses, põhjustab elektronide l i i k u v u s e v ä h e n e m i n e. Tõepoolest, temperatuuri tõusuga intensivistuvad kristallvõre võnkumised, mille tulemusena kokkupõrgete arv suureneb, ehk teiste sõnadega, väheneb vaba tee pikkus. Vaba tee pikkuse vähenemine aga tähendab elektronide keskmise kiiruse vähenemist, s.t. valemi $\vec{v} = \mu_n \cdot \vec{E}$ järgi peab vähenema liikuvus μ_n .

4. Dielektrikute omadused tsooniskeemi alusel.

Kirjandus:

(1) - lk. 16-18 (punkt 4.)

(3) - lk. 47-52.

Soovitav on kasutada kirjandusest (1).

Juhime lugeja tähelepanu järgnevatel olulistele momentidele kirjanduse läbitöötamisel:

1) Dielektrik ei juhi elektrit tänu sellele, et valents-

tsoon on täielikult täidetud elektronidega, kuna juhtivustsoon on tühi. Siit pärinebki viimase kohta nimetus "vaba tsoon". Säärane elektronide jaotus tsoonide vahel on omane madalatele temperatuuridele (rangelt võttes ainult 0°K juures).

2) On teada, et isolaatorid ei ole ideaalsed mittejuhid praktikas esinevatel temperatuuridel, vaid on kindla eritakistusega $\sim 10^{10} \Omega\text{cm}$. Samuti teame, et temperatuuri tõusul halvenevad isolaatorite omadused. Neid isolaatorite omadusi võib hõlpsasti selgitada tsooniskeemi alusel, kui oletada, et soojusenergia mõjul võivad elektronid üle minna valentstsoonist juhtivustsooni. Esialgu näib, nagu oleks aatomite termilise liikumise energia mitteküllaldane elektronide üleviimiseks juhtivustsooni, sest aatomi keskmine termiline energia toatemperatuuril on suurusjärgus $0,04\text{ eV}$, isolaatorite keelutsooni laius aga $E_g \gg 1,5\text{ eV}$. Tegelikult seisneb asi selles, et termiline liikumine on kaootiline protsess, millel on statistiline iseloom ja millest võtab osa väga suur hulk osakesi (aatomeid). Säärases protsessis aga esineb alati kõrvalekaldumisi keskvärtusest ehk nn. fluktuatsioonid. Fluktuatsioonide tõttu, mida esineb muide igal temperatuuril $T > 0^{\circ}\text{K}$, leidub teatud hulk aatomeid, mille termiline energia on võrdne või ületab keelutsooni laiuse. Sellised aatomid võivad naabruses asuvate seotud elektronidega kokku pörgates neile üle anda oma energia, mis on piisav elektroni üleviimiseks juhtivustsooni. Mida kõrgem on temperatuur, seda suurem on fluktuatsioonide arv, absoluutse nulli juures viimane väheneb aga nullini. Tõenäoliselt, et mingi aatomi termiline energia saavutab väärtuse $E = \Delta E$ (ΔE - keelutsooni laius), on võrdeline eksponentsiaalse kordajaga $e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$ (raamatust (1) lk. 17 tuleb parandada trükiviga väljendis $e^{-\frac{\Delta E}{km}}$, m asendada T-ga). Järelikult kasvab elektronüleminekute arv valentstsoonist juhtivustsooni temperatuuri tõusuga ja väheneb keelutsooni laiuse suurenemisega.

3) Temperatuuridel $T > 0^{\circ}$ muutub nimetus "vaba tsoon" formaalseks, sest tsoon ei ole enam tühi. Kirjanduses kasutatakse terminit vaba tsoon ka toatemperatuuridel olevate pooljuhtide jaoks, mida ei tohi aga sel juhul mõista sõnasõnaliselt.

Õnnestunum termin on seepärast "juhtivustsoon".

5. Pooljuhtide omadused tsooniskeemi alusel.

Kirjandus:

(1) - lk. 18-25.

(3) - lk. 52-57.

Soovitav on tutvuda materjaliga mõlema õpiku baasil, osutades tähelepanu järgnevale:

1) Keelutsooni laius määrab ära pooljuhtide erinevuse isolaatoritest. Tänu väiksemale keelutsooni laiusele, võrreldes isolaatoritega, on pooljuhtides juba toatemperatuuril vabade elektronide kontsentratsioon juhtivustsoonis küllaldane, et tagada eritakistus $\rho = 10^{10} \Omega \text{ cm}$.

2) Elektronide ergastamisel valentstsoonist juhtivustsooni võrdub elektronide arv juhtivustsoonis (vahel tarvitatakse veel terminit "juhtivuselektronid") vakantsete kohtade arvuga valentstsoonis. Viimaseid nimetatakse aukudeks.

3) Elektron- ja aukjuhtivus. Välise elektrivälja mõjul liiguvad juhtivustsooni elektronid elektrivälja suunale vastassuunas. Samuti püüavad elektrivälja mõjul liikuma hakata ka valentstsooni elektronid. Pooljuhtides on toatemperatuuril valentstsoonis alati vakantseid elektronseisundeid ehk auke. Nagu teame, muutub elektronide suunatud liikumine võimalikuks, kui tsoonis on vabu kohti. Tekkivat laengute liikumist valentstsoonis võib ette kujutada piltlikult. Vaatleme näiteks auku mingisuguse aatomi juures. Elektrivälja mõjul läheb kõrval asuva aatomi valentselektron üle vaadeldava aatomi tühjale energianivoole, täites vaba koha. Nüüd asub auk juba järgmise aatomi juures elektrivälja suunas. Sellise protsessi paljukordse kordumise tulemusena nihkub auk elektriväljas vastupidiselt elektronide liikumise suunale, s.t. auk liigub nii nagu positiivselt laetud osake. Seepärast võibki vaadelda elektronide liikumise asemel valentstsoonis positiivsete aukude liikumist.

Järelikult esineb pooljuhtides kaks erinevat elektrijuhtivuse mehhanismi - elektron- ja aukjuhtivus. Esimene neist vastab elektronide liikumisele juhtivustsoonis,

teine aukude liikumisele valentstsoonis välise elektrivälja mõjul.

4) I s e p o o l j u h i d, o m a j u h t i v u s, e f e k t i i v n e m a s s. Ideaalselt korrapärase kristallvõrega pooljuhtides on ainsaks elektrijuhtivuse tekkimise võimaluseks elektronide üleminekud valentstsoonist juhtivustsooni (sageli tarvitatakse veel väljendit üleminekud tsoon - tsoon). Sel juhul on voolukandjateks antud temperatuurile vastav arv elektrone juhtivustsoonis ja võrdne arv auke valentstsoonis. Niisuguseid pooljuhte nimetatakse i s e p o o l j u h t i d e k s ja nende elektrijuhtivust o m a j u h t i v u s e k s. Olgugi, et elektronide ja aukude arv isepooljuhtides on võrdne, võib nende osa summaarses juhtivuses olla erinev. Asi seisneb selles, et kui elektroni liikumist kristallis kirjeldada võrrandiga, mis formaalselt langeks ühte elektroni liikumise võrrandiga vaakumis, siis asendub elektroni mass nn. efektiivse massiga m^* . Elektronide ja aukude efektiivsed massid m_n^* ja m_p^* on erinevad. Ge puhul näiteks $m_p^* > m_n^*$ ja seepärast on ka liikuvus väiksem. Voolutihedus antakse valemiga

$$\vec{j} = en\vec{v}$$
, kus e = elektroni laeng, n - laengukandjate kontsentratsioon, \vec{v} - viimaste keskmine kiirus. Kasutades meile tuntud avaldist $\vec{v} = \mu_n \vec{E}$, saame:

$$\vec{j} = en\mu_n \vec{E}.$$

Pooljuhi puhul tuleb arvestada elektronide ja aukude osa eraldi, seepärast:

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = (en\mu_n + ep\mu_p) \vec{E},$$
 kus

\vec{j}_n, \vec{j}_p - elektron- ja aukvoolutihedused,

n, p - vastavalt elektronide ja aukude kontsentratsioonid,

μ_n, μ_p - vastavalt elektronide ja aukude liikuvused.

Nagu märksime, puhta Ge puhul $\mu_n < \mu_p$ ja järelikult

$$\frac{j_n}{j_p} > 1, \text{ sest } n = p.$$

5) L i s a n d i d p o o l j u h t i d e s. Ideaalse kristallvõrega pooljuhti praktikas ei esine. Alati on antud

pooljuhi kristallvõres mingi teise aine aatomeid, tühjad sõlmed, aatomid või ioonid sõlmede vahel, nihked plastilise deformatsiooni tulemusena, lõhenemised jne. Kõik need defektid võivad põhjustada diskreetsete energianivoo olemasolu keelutsoonis ja seejärel pärast kasutatakse sageli üldist väljendit "lisanäid" ehk "lisanäitsetriid" kõigi kohta. Seega esinevad lisandtsentrid kristallides võõraste aatomite näol, aga samuti vakantsete sõlmede, sõlmedevaheliste aatomite jne. näol. Igale lisandtsentrite liigile vastavad kindlad energianivood keelutsoonis, nn. lisanäinivood. Lisandtsentrite energianivood kristallis sarnanevad viimastele neutraalses aatomis, sest lisandite kontsentratsioon kristallis on tavaliselt väike, mille tulemusena ka lisandi aatomite vastastikune mõju on kaduvalt väike. Suurte lisandikontsentratsioonide puhul on võimalik lisanditsoonide tekkimine.

6) Lisandpooljuhid ja lisanäjuhitivus.

Pooljuhte, mis sisaldavad lisandeid, nimetatakse lisanäpooljuhtideks. Kui lisandinivoodel $T = 0^\circ K$ juures asuvad elektronid, siis muutub kristallvõre soojusliku võnkumise energia juba üsna madalatel temperatuuridel küllaldaseks, et elektrone üle viia juhtivustsooni, samal ajal kui tsoon-tsoon üleminekuid ei pruugi veel arvestada. Elektri juhtivust põhjustavad sel juhul ainult vabad elektronid juhtivustsoonis, augud aga jäävad lokaliseerituks lisandtsentritel. Säärase lisandpooljuhi kohta kasutatakse tavaliselt terminit "n-tüüpi pooljuht" või "elektronne pooljuht". (Nimetus "n-tüüpi" on tuletatud sõnast "negative"). Lisandeid, mis annavad elektrone juhtivustsooni, nimetatakse doonoriteks (andjad). Kui aga lisandinivoodel $T = 0^\circ K$ juures on vakantsed kohad (augud), siis temperatuuri tõusul enne tsoon-tsoon üleminekute algust täituvad augud lisanditel elektronidega valentstsoonist, mille tulemusena valentstsooni ilmuvad liikuvad augud. Lisandeid, mis haaravad elektrone valentstsoonist, nimetatakse aktsseptoriteks. Akseptoritega legeritud pooljuhtides on

voolukandjateks augud ja seepärast tarvitatakse sel juhul terminit "p-t üüpi" või aukpooljuht (p-tüüpi - sõnast "positive").

Elektrijuhtivust, mis on tingitud ainuüksi lisanditest, nimetatakse lisandjuhtivuseks.

7) Segajuhtivus. Oluline on asjaolu, et ainult madalatel temperatuuridel esineb lisandpooljuhtides puhatal kujul lisandjuhtivus. Kõrgematel temperatuuridel aga algavad üleminekud tsoon-tsoon. Tähendab, teatud temperatuurist alates esinevad koos tsoon-tsoon üleminekutest tingitud omajuhtivus ja lisandjuhtivus, mida koos nimetatakse segajuhtivuseks. Edasisel temperatuuri tõusul võib arvestada, et kõik doonorinivood on elektronid ära andnud (aktseptorinivood aga täidetud elektronidega) ning laengukandjate kontsentratsioon kasvab ainult tsoon-tsoon üleminekute arvel ja pooljuht käitub edaspidi juba praktiliselt nagu isepooljuht (määravaks on üleminekud tsoon-tsoon).

8) Põhilised ja mittepõhilised laengukandjad.

Doonorlisanditega legeeritud pooljuhtides ületab elektronide kontsentratsioon juhtivustsoonis tunduvalt aukude kontsentratsiooni valentstsoonis ja seepärast nimetatakse esimesi põhilisteks, auke aga mittepõhilisteks laengukandjateks. Kirjanduses tähistatakse elektronide kontsentratsiooni (põhilised laengukandjad) n-tüüpi materjalis sümboliga n_n , aukude kontsentratsiooni aga sümboliga p_n (mittepõhilised laengukandjad). Aktseptorlisanditega legeeritud pooljuhtides aga määrab juhtivuse aukude kontsentratsioon valentstsoonis, mis ületab tunduvalt elektronide kontsentratsiooni juhtivustsoonis. Siin on augud põhilised, elektronid aga mittepõhilised laengukandjad (vastavad tähised p_p ja n_p).

9) Halli efekt.

Halli efekti mõõtmine võimaldab määrata pooljuhi tüüpi (n- või p-tüüp), laengukandjate kontsentratsiooni, aga samuti ka liikuvust, kui varem on teada materjali juhtivus. Halli efekt leiab kasutamist ka tehnikas (vt. allpool), sellepärast

on tutvumine Halli efektiga pooljuhtides vajalik. Kirjandusest võib kasutada (1) lk. 22-25 või (2) lk. 373-376. Peatählepanu tuleb pöörata füüsikalistele protsessidele, mis põhjustavad Halli pinge tekkimise vooluga pooljuhi asetamisel magnetvälja, aga samuti põhiolemuse $U_x = R_H \cdot \frac{IH}{b}$ lahtimõtestamisele.

III. Ge ELEKTRILISED OMADUSED.

Kirjandus:

- (1) "Полупроводниковая электроника" , lk. 25-32.
- (2) У.Данлэн, Введение в физику полупроводников, ptk.11, lk. 238-280.

Õpiku (2) materjal on käesoleva kursuse jaoks liialt ulatuslik ja seepärast soovitame kirjandusest (1). Seal antud materjal kordab Ge põhjal teatud määral eelnevat, kuid teises valguses, mille tõttu aitab kaasa eelmise osa paremaks mõistmiseks. Materjali läbitöötamisel pidada silmas allpool toodud punkte.

1. Ge kristallvõre ehitus ja sidemed aatomite vahel.

- (1) lk. 26-27.

2. Elektrijuhtivuse tekkimine germaaniumis elektronsidevõre skeemi alusel (1) lk. 27-28.

Tuletame meelde, et valentssideme purustamine ja seega elektroni vabastamine tähendab tsooniskeemi keeles elektroni üleviimist valentstsoonist juhtivustsooni.

3. Ge omajuhtivus. (1) lk. 28-29.

Siin kohtume esmakordselt mõistega " t a s a k a a l u l i n e k o n t s e n t r a t s i o o n ". Bespool oli põhiliselt juttu elektronide termilistest üleminekutest valentstsoonist juhtivustsooni. On aga võimalik ka vastupidine protsess: vaba elektron kohtub auguga ja mõlemad lakkavad eksisteerimast, s.t. valentsside taastub ehk tsooniskeemi keeles tähendab see juhtivuselektroni langemist valentstsooni. Nii-

sugast elektron-auk paaride "kadumist" nimetatakse rekombinatsiooniks. On loomulik, et ajaühikus kaduvate elektronide ja aukude arv on seda suurem, mida kõrgem on nende kontsentratsioon (augu ja elektroni kohtumise tõenäolisus on proportsionaalne nende kontsentratsioonidega). Seega on rekombineeruvate elektron-auk paaride arv võrdeline korrutisega $n \cdot p$. Tasakaaluline kontsentratsioon tähendab seda, et kindla temperatuuri juures tasakaalustub rekombinatsiooni kiirus paaride genereerimise kiirgusega (tsoon-tsoon üleminekute arv ajaühikus). Järelikult jääb elektronide ja aukude arv vastavates tsoonides konstantseks.

4. Ge lisandjuhtivus valentssidemete skeemi alusel.

(1) lk. 29-30.

Järgneva materjali paremaks mõistmiseks on vaja selgesti ette kujutada, mispärast kehtib ka lisandpooljuhi kohta võrdsus $n \cdot p = n_1^2$ (1). Küsimuse selgitamiseks vaatleme ideaalset isepooljuhti, milles elektronide kontsentratsioon on võrdne aukude kontsentratsiooniga $n_1 = p_1$. Arvestades viimast võrdst, saame automaatselt valemi (1), kui tähistada n_1 n-ga ja p_1 p-ga.

Sama kristalli legeerimine doonorlisandiga suurendab elektronide arvu juhtivustsoonis, mille tulemusena muutub ka rekombinatsioonikiirus. Nüüd ei täitu enam tingimused $n = n_1$ ja $p = p_1$. Jälgime, kuidas muutub aukude kontsentratsioon. Aukude genereerimise kiirus valentstsoonis (selle määrab ära temperatuur, aga mitte lisandite olemasolu, kui viimaste kontsentratsioon on väike) ei muutu, rekombinatsioonikiirus aga kasvab tänu elektronide arvu suurenemisele juhtivustsoonis doonorite arvel, järelikult peab aukude kontsentratsioon vähenema. Nüüd määrab rekombinatsioonikiiruse korrutis $n \cdot p$, kus n on vabade elektronide kontsentratsioon pärast legeerimist ($n > n_1$), p aga aukude kontsentratsioon valentstsoonis ($p < p_1$). Nagu mainitud, ei muutu aukude genereerimise kiirus võrreldes viimasega isepooljuhtides, jäädes võrdseks korrutisega $n_1 \cdot p_1 = n_1^2$. Püsiva temperatuuri juures saabub termodünaamiline tasakaal, mille puhul aukude tekkimise kiirus peab võrduma nende "kadu-

mise" kiirusega, järelikult $n \cdot p = n_1^2$. Tuletades meelde termineid põhilised ja mittepõhilised laengukandjad, võib viimase võrduse kirjutada kujul $n_n \cdot p_n = n_1^2 - n - \text{tüüpi materjali jaoks}$ ja $p_p \cdot n_p = n_1^2 - p - \text{tüüpi materjali jaoks}$.

5. Fotojuhtivus (1) lk. 30-32.

Materjaliga tutvumisel kohtub lugeja uute terminitega, mille tundmiseta pole võimalik pooljuhtidealase kirjanduse lugemine. Pooljuhtide fotoelektriliste omaduste vaatlemisel on vaja meelde tuletada, et tänu termilisele ergastamisele on pooljuhtides mistahes temperatuuril $T > 0^\circ \text{ K}$ kindel, antud temperatuurile vastav, vabade elektronide ja aukude kontsentratsioon. See kontsentratsioon vastab termodünaamilisele tasakaalule pooljuhis ja seepärast nimetatakse **t a s a k a a l u l l i s e k s**, sageli ka veel **p i m e k o n t s e n t r a t s i o o n i k s** (kriipsutades seega alla asjaolu, et laengukandjate tekitamisel pole kaastegev valgus). Kristalli valgustamisel konstantse intensiivsuse juures tekitatakse tsoonidesse footonite energia arvel täiendav arv elektrone ja auke. Jällegi saabub tasakaal genereerimis- ja rekombineerumiskiiruste vahel. Nüüd aga ei saa enam rääkida termodünaamilisest tasakaalust. Valgustamise katkestamisel kaovad nn. fotoelektronid ja augud ja vastavad kontsentratsioonid vähenevad väärtustest $n_0 + \Delta n$ ja $p_0 + \Delta p$ vastavate pimekontsentratsioonideni n_0 ja p_0 . Sageli nimetatakse laengukandjate lisakontsentratsiooni ($\Delta n, \Delta p$) **k a l i i g k o n t s e n t r a t s i o o n i k s**. Fotoelektronide ja aukude kohta tarvitatakse veel terminit **m i t t e t a s a k a a l u l l i s e d l a e n g u k a n d j a d**. Ehkki ka püsiva valgusega valgustamisel tekib kristallis tasakaal ergastamise ja rekombinatsiooni vahel; püütakse viimase terminiga rõhutada fotoelektronide ja aukude ajutist iseloomu (valguse väljalülimisel viimased kaovad).

Mittetasakaaluliste laengukandjate eluea all tuleb mõista kogu fotoelektronide kollektiivi keskmist eluiga. Eluea kestus pooljuhis on väga tundlik lisandite kontsentratsiooni ja omaduste suhtes. See asjaolu näitab, et lisanditele kuulub oluline osa rekombinatsiooniprotsessis.

IV. ELEKTRONIDE JAOTUS ENERGIA JÄRGI.

Kirjandus:

(1) Р.Д.Миддлбрук, Введение в теорию транзисторов, 4.peatükk, lk. 58-75.

(2) Полупроводники в науке и технике, т I lk.95-108.

Lisamaterjal:

(3) M.Sominski, Pooljuhid ja nende kasutamine, lk.27-30.

(4) Полупроводники в науке и технике, т.II, lk.572-578.

Toodud kirjandusest on vaja tingimata läbi töötada (1) lk. 58-75. Siin ei anta Fermi jaotusfunktsiooni tuletust, mis võetakse kui valmis resultaat statistilisest mehhaanikast. Samuti ei arvutata avaldist kvantseisundite tiheduse kohta teatud energiavahemikus, mida tehakse tahke keha kvantteoorias. Arvestades ülalmainitud, on (1) kõige enam kooskõlas kursuse iseloomuga.

Käesoleva peatüki eesmärgiks on välja selgitada allpool toodud küsimused.

1. Fermi jaotusfunktsiooni sõltuvus temperatuurist.

(1) lk. 58-61. Tingimata kasutada siin veel (2) lk.99, sõnadest "Итак мы доказали..." kuni lk.100 "II Статистика электронов в полупроводниках".

2. Lisandinivoode "asustatuse" määramine Fermi jaotusfunktsiooni abil. (1) lk. 61-62 viimase lõiguni.

3. Vabade elektronide kontsentratsiooni väljendamine Fermi funktsiooni abil. (1) lk. 62-64.

Pöörata tähelepanu asjaolule, mispärast võib pooljuhtides sageli asendada Fermi jaotusfunktsiooni

$$f = \frac{1}{e \frac{W - W_F}{KT} + 1}$$

Maxwell-Bolzmani jaotusfunktsiooniga

$$f = e^{\frac{W_F - W}{KT}}$$

4. Fermi nivoo määramine pooljuhtides.

1) Põhiliseks tugipunktiks Fermi nivoo määramisel on kristalli neutraalsuse tingimus tasakaalulises seisundis, mis seisneb selles, et kõigi negatiivsete ja positiivsete laengute sum-

ma tsoonides ja keelutsooni diskreetsetel nivoodel võrdub nulliga. (1) lk.64.

2) Fermi nivoo isepooljuhis. (1) lk.65.

3) Fermi nivoo asend n-tüüpi pooljuhis (1) lk.65-66.

4) Fermi nivoo p-tüüpi pooljuhis. (1) lk.66-67.

Juhime lugeja tähelepanu sellele, et võrdused

$n_n \cdot p_n = n_i^2$ ja $p_p \cdot n_p = n_i^2$ saadakse nüüd formaalsete matemaatiliste teisenduste teel.

5) Seosed laengukandjate (kontsentratsiooni) ja Fermi nivoo asukoha vahel tsooniskeemil. (1) lk.67-68.

6) Juhtivuse avaldamine laengukandjate tiheduse kaudu. (1) lk.68-70.

7) Valemid praktiliseks kasutamiseks (1) lk.71-74.

Soovitav on veel läbi lugeda (1) lk.74-75.

Märkus: Kirjanduses kasutatakse sageli Fermi nivoo kõrval terminit keemilise potentsiaali nivoo. Keemiline potentsiaal on mõiste termodünaamikast ja nimelt antud temperatuuril $T = \text{const.}$ ning püsivate välisparameetrite juures võrdub süsteemi vabale energiale ühe osakese kohta. Fermi jaotusfunktsioonis esinebki keemiline potentsiaal μ (vt. (2) lk.96-99), nii et termin Fermi nivoo on lihtsalt keemilise potentsiaali nivoo teine nimetus.

V. VÄLJUMISTÖÖ JA KONTAKTPOTENTSIAALIDE VAHE.

Kirjandus:

(1) Полупроводники в науке и технике, т. I, lk.109-112 ja lk. 151-159.

Täiendav materjal:

(2) M.Sominski, Pooljuhitud ja nende kasutamine, lk.30-33.

Kontaktühendused on paljude pooljuhuriistade (diodid, transistorid, ventillifotoelemendid, termoelektrigeneraatorid jne.) töö aluseks. Seepärast nõuab V peatüki juurde näidatud kirjandus eriti hoolikat läbitöötamist.

Tähelepanu pöörata järgnevatele momentidele:

1. Elektronide väljumistöö metallidest ja pooljuhtidest.
(1) lk. 109.

Kui Fermi energia väärtuse arvestamisel võtta aluseks (nullnivooks) elektroni energia vaakuumis, siis võrdub väljumistöö Fermi energia väärtusega, mis on võetud vastasmärgiga. Pooljuhtide puhul tundub nagu arusaamatuna, et väljumistöö on võrdne energiaga, mis oleks vaja anda elektronile selle üleviimiseks vaakuumi Fermi nivoolt, kus aga tegelikult elektrone ei ole (juhul, kui Fermi nivoo asub keelutsooni piires ega lange ühte lisandinivooga). Elektronid asuvad juhtivustsoonis, lisandinivoodel ja valentstsoonis ning vastavalt sellele võivad esineda kolm erisugust väljumistööd. Tegelikult toimub aga elektronide lahkumine kõigist kolmest "allikast" korraga ning me mõeldame mingisugust keskmist väljumistööd. Nagu näitab termodünaamiliste tingimuste vaatlus ((1) lk. 110), peavad üleminekud juhtivustsoonist, valentstsoonist ja lisandinivoodelt vaakuumi toimuma niisuguses proportsioonis, et keskmine väljumistöö oleks võrdne Fermi nivool asuva elektroni väljumistööga (nn. isotermiline väljumistöö).

2. Kontaktpotentsiaalide vahe tekkimise põhjused.

(1) lk. 111, 112 ja 151-154.

Materjali läbitöötamisel pöörata vähem tähelepanu mateemaatikale, enam tsooniskeemidele (joon. 2 lk. 162 (1)) ja füüsikalistele protsessidele, mis kutsuvad esile elektrivälja tekkimise metalli ja pooljuhi lähendamisel.

Kontaktvälja tekkimise põhjuseks on erinevad väljumistööde väärtused.

Juhime veel lugeja tähelepanu sellele, et tasakaalulistest tingimustes peab Fermi nivoo pooljuhis ja metallis asuma ühel tasemel. Tasakaal pooljuhi ja metalli vahel võib tekkida mitte ainult tänu elektronide vahetamisele metalli ja pooljuhi vahel läbi vaakuumi, vaid näiteks ka nende vahetu kontakti puhul, aga samuti ka juhul, kui metall ja pooljuht ühendada mingi juhtmega.

Enne kui üle minna metalli ja pooljuhi vahetu kontakti vaatlemisele, on vaja hästi mõista (1) lk.154. toodud näidet,

mis tõendab, et pooljuhi ja metalli lähendamisel (vahekaugus 1 cm) laengukandjatest vaese pinnakihi paksus pooljuhis on palju väiksem metalli ja pooljuhi vahelisest kaugusest. Sel juhul võib rääkida, et kontaktvälja tekitavad laengud, mis asuvad metalli ja pooljuhi pinnal.

3. Pooljuhi kontakt metalliga. (1) lk.154-159.

Siin on oluline, et laengukandjatest vaene kiht tungib pooljuhi sügavusse mitme tuhande aatomikihi ulatuses, kuna aga elektronidega rikastunud kiht metallis jääb endiselt väga õhukeseks. Praktiliselt võib lugeda, et elektronid asuvad metalli pinnal. Elektrivälja tungimine suurele sügavusele pooljuhis on tingitud suhteliselt väikesest elektronide kontsentratsioonist viimases. (Vaadeldakse esialgu n-tüüpi materjali). Tänu kontaktvälja tungimisele pooljuhti, muutub elektroni energia laengukandjatest vaeses kihis, võrreldes selle all asuva osaga, kus kõik jääb muutumatuks. Tsooniskeemi keeles tähendab selline elektroni energia muutus tsoonide kõverdumist pinnakihis (antud juhul ülespoole). Kriipsutama alla, et keelutsooni laius kontaktvälja mõjul pinnakihis ei muutu, sest kontaktvälja tugevus on tunduvalt väiksem aatomisiseste väljade tugevusest.

Siiani oli tegemist juhuga, mil metalli väljumistöö X_2 oli suurem pooljuhi väljumistööst X_1 , kusjuures vaadeldi ainult n-tüüpi pooljuhti. Sel juhul tekib pooljuhi pinnal elektronidest vaene kiht, mille takistus on tunduvalt suurem ülejäänud osa takistusest ja mida seepärast nimetatakse t õ k e k i h i k s. Võimalik on veel k ü l l a s t u n u d k i h i tekkimine. (1) lk.158. on toodud neli võimalikku tsooniskeemi pooljuhi-metalli kontakti puhul:

- 1) $X_2 > X_1$ n-tüüp
- 2) $X_2 > X_1$ p-tüüp
- 3) $X_2 < X_1$ n-tüüp
- 4) $X_2 < X_1$ p-tüüp

Tsooniskeeme nende nelja juhu jaoks on vaja teada järgneva materjali hõlpsamaks mõistmiseks.

VI. POOLJUHTDIODID.

Kirjandus:

(1) Полупроводниковая электроника, lk.32-41.

(2) У.Данлэп, Введение в физику полупроводников,
lk. 160-170 ja lk. 231-236.

(3) Полупроводники в науке и технике, т.II, lk.7-22.

Kirjandusest soovitame kasutada (1), kuna (2) ja (3) on kasulikud lugejaile, kes on juba teatud määral tuttavad pooljuhtdiodide tööga. Kirjanduse läbitöötamisel pöörata tähelepanu alljärgnevatele küsimustele.

1. p-n üleminekute valmistamise meetoditest.

(1) - lk. 32-33, (2) - lk. 231-236.

Kahe eri tüüpi pooljuhi (n- ja p-tüüpi) ühendamisel tekib üleminek elektronjuhtivuselt aukjuhtivusele, nn. p-n üleminek. p-n üleminekuid kasutatakse paljudes pooljuhtseadistes, seepeärast on kasulik omada ettekujutust nende valmistamise meetoditest.

2. Tõkkekihi tekkimise põhjused p-n üleminekus.

(1) - lk. 34-36; (3) - lk. 8 lõigust: "Теория p-n перехода..." kuni lk.9. lõiguni "При подаче на p-n переход..."

Kirjandusega tutvumisel pöörata tähelepanu aktseptor- ja doonorliisandite jaotusele piki kristalli, elektronide ja aukude kontsentratsioonile kristallis, ruumlaengu tekitajatele ja määrgile kristalli n- ja p-tüüpi piirkondades ning tõkkekihi paksusele mõlemal pool astmelist p-n üleminekut. Samuti oluline on dūnaamilist tasakaalu tekitavate protsesside tundmine. Väga kasulik on tutvuda p-n ülemineku tsooniskeemiga (/ 2 / lk. 161, joon.76.). Joonisel on toodud tsooniskeemid sujuva ja astmelise p-n ülemineku kohta. Tsooniskeemi saamise reegel on lihtne: asetada n- ja p-tüüpi materjalide tsooniskeemid kõrvuti niiviisi, et Fermi nivood asuksid ühel tasemel (seda nõuab tasakaalu tingimus), seejärel aga ühendada juhtivustsooni põhja ja valentstsooni lage kujutavad jooned sujuva kõvera-ga. Tsooniskeemil on piltlikult näha, et elektronide üleminek

n-piirkonnast p-piirkonda on raskendatud potentsiaalse barjääri tõttu (elektron peab liikuma "ülesmäge"), samuti ka aukude üleminek p-piirkonnast n-piirkonda. Siinjuures on vaja tähele panna, et aukude energia on suurem kristalli n-piirkonnas. Kontaktväli soodustab aga aukude ja elektronide liikumist vastupidistes suundades, s.t. mittepõhilised laengukandjad ei leia liikumisel p-n üleminekus tõket potentsiaalse barjääri näol.

3. Alaldamise protsess p-n üleminekus (diood).

(1) - lk. 36-39.

Välise pinge rakendamine p-n üleminekul purustab viimasel tekkinud dünaamilise tasakaalu. Pinget, mis on rakendatud plusspoolusega n-tüüpi materjalile, miinusega aga p-tüübile, nimetatakse v a s t u p i n g e k s. On tähelepanuvääriv, et sel juhul vool kristallis praktiliselt ei sõltu pingest ja määratakse ära mittepõhiliste laengukandjate kontsentratsiooniga ja nende rekombineerumiskiirustega p-n ülemineku mõlemas piirkonnas. Vastupinge puhul nimetatakse p-n üleminekut läbivat voolu v a s t u v o o l u k s. Vastuvool muutub eksponentsiaalselt vastupinge suurenemisel ja saavutab konstantse väärtuse, mida nimetatakse k ü l l a s t u s v o o l u k s. Seoses vastupinge ja -vooluga räägitakse diodi t õ k k e s u u n a s t (või vastusuund).

Vastupidise poolaarsusega pinget (+) p-tüüpi materjalil, (-) n-tüüpi materjalil) nimetatakse o t s e p i n g e k s, vastavat voolu o t s e v o o l u k s, suunda aga l ä b i l a s k v u s s u u n a k s (otsesuunaks). Otsevool sõltub oluliselt rakendatud pingest, sest viimane vähendab põhilaengukandjate liikumist tõkestavat potentsiaalset barjääri (läbi p-n ülemineku vastastüüpi piirkonda).

Väga tähtis osa p-n üleminekute juhtimismehhanismis on nn. i n j e k t s i o o n i l. Termin "injektsioon" all mõistetakse mittepõhiliste laengukandjate sisseviimise protsessi antud tüüpi pooljuhti. Õpikus (/ 1 / - lk. 38-39) on see nähtus valgustatud väga hästi. Pöörata tähelepanu voolu auk- ja elektronkomponentide jaotusele piki kristalli (otse- ja vastupinge puhul).

materjali ruumlaengu piirkonna lähedasele neutraalsele alale. Järelikult on laadumismahtuvus seotud p õ h i l a e n g u k a n d j a t e g a .

Difusioonmahtuvus on vahetult seotud injektsiooninähtusega ja järelikult on oluline otsepingete puhul. Nagu nüüd teame, suureneb tänu injektsioonile otsepingete rakendamisel mittepõhilaengukandjate kontsentratsioon ruumlaengukihi pii-ridel (aukude kontsentratsioon n-tüübis ja elektronide kontsentratsioon p-tüübis) ja langeb eemaldumisel p-n üleminekust eksponentsiaalselt tasakaalulise väärtuseni (n_p ja p_n). Järelikult muutub pinge muutumisel ka injekteeritud aukude ja elektronide üldlaeng (nagu mahtuvuse puhul) vastavalt n- ja p-tüüpi materjalis, s.t. et vahelduva pinge puhul tuleb arvestada ka seda mahtuvust. Nimetust difusioonmahtuvus kasutatakse sellepärast, et mittepõhilaengukandjate levimine mõlemal pool p-n üleminekut (kontsentratsioon muutub eksponentsiaalselt kaugusega üleminekust) on seotud nende difusiooniga.

Teooria näitab, et sageduse ω ja eluea τ juures sõltub difusioonmahtuvus otsepingest eksponentsiaalselt ($I \sim e^{\alpha U}$, vt. (1) lk. 37 avaldis (4) ja lk.40 avaldis (8)). Difusioonmahtuvuse sõltuvus mittepõhilaengukandjate elueast τ on mõistev, sest suurema τ puhul on mittepõhilaengukandjate üldarv antud pinge juures suurem kui väikese τ juures. Vastavalt on suuremad ka mittepõhiliste laengukandjate arvu muutused pinge muutumisel, s.t. suuremale τ -le vastab suurem mahtuvus.

Difusioonmahtuvuse sõltuvus sagedusest on tingitud asjaolust, et kõrgete sageduste puhul ei jõua moodustuda antud pingele vastav mittepõhiliste laengukandjate kontsentratsiooni jaotus piki kristalli laengukandjate piiratud difusioonikiiruse tõttu. Muutused jõuavad toimuda ainult ruumlaengu piirkonna lähedal, s.t. et antud pingemuutusele kõrgetel sagedustel vastab väiksem laengukandjate üldarvu muutus. See on samaväärne mahtuvuse vähenemisega sageduse suurenemisel.

5. Temperatuuri mõju pooljuhtdiodide tööle.

(1) - lk. 40-41.

VII. POOLJUHTTRIOODID.

Kirjandus:

- (1) Полупроводниковая электроника, lk.42-57; 61-86.
- (2) Полупроводники в науке и технике, т.I, lk.205-219.

Täiendav lugemisvara:

- (3) M.Sominski, Pooljuhid ja nende kasutamine, lk.63-71.
 - (4) P.Д.Миддлбрук, Введение в теорию транзисторов, lk.131-177.
 - (5) Полупроводники в науке и технике, т.II, lk.22-28.
- Tutvumisel transistorite tööga soovitame kirjandusest (1), kus materjal on esitatud selgelt ning arusaadavalt.

Kirjanduse läbitöötamisel arvestada alljärgnevaid alapunkte:

1. Kahe elektron- auk ülemineku vastastikune mõju sõltuvalt nendevahelisest kaugusest.

- (1) - lk. 42-47.

Tähelepanu väärib asjaolu, et p-n üleminekute lähendamise tulemusena väheneb injekteeritud aukude arv n-piirkonnas mitte eksponentsiaalselt mittepõhiliste laengukandjate tasakaalulise kontsentratsioonini p_n , vaid langeb väärtusest $p_0 = p_n \cdot e^{\frac{eU_1}{kT}}$ (U_1 - otsepinge) vasakpoolse ülemineku ruumlaengu piiril (n-materjalis) kuni nullini parempoolse n-p ülemineku ruumlaengu piiril.

- Esmakordselt kohtume järgmiste uute mõistetega, mida on vaja tingimata teada:

- 1) emitter,
- 2) kollektor,
- 3) baas,
- 4) injektsioonikoefitsient,
- 5) ülekandekoefitsient,
- 6) voolu võimendustegur.

2. Trioodi volt-ampere-karakteristikud.

- (1) - lk. 47-49.

3. Voolu jaotus trioodis.

(1) - lk. 49-52.

4. Trioodi baasi takistuse mõju arvestamine.

(1) - lk.52 viimane lõik, lk. 53 valemini (17).

5. Trioodi lülitamine maandatud emitteriga.

(1) - lk.53-54.

6. Negatiivse tagasisidestuse pinge tekkimine trioodis kollektori ja emitteri vahel tänu kollektor-ülemineku ruumlaengu piirkonna laiuse muutumisele sõltuvalt pingest (1) lk. 54-57.

7. Trioodi parameetrite sõltuvus sagedusest.

1) Difusiooniprotsesside kestuse mõju ülekandekoeffitsiendi (β) sageduskarakteristikule. (1) lk. 61-62.

2) Emitteri ja kollektori laadumis- ja difusioonmahtuvuste mõju trioodi sageduskarakteristikutele. (1) lk.66-68.

8. p-n-p transistori lihtsustatud teooria.

(2) - lk. 205-215.

Põhiline tähelepanu pöörata trioodi parameetrite sõltuvusele viimase valmistamiseks kasutatavast materjalist, geometriast ja töörežiimist. Samuti võrrelda maandatud emitteriga transistorit ja elektronlampi võimendajatena.

VIII. MITMESUGUSEID POOLJUHTIDE RAKENDUSI.

(1) У.Данлэп, Введение в физику полупроводников.

(2) М.Сомински, Pooljuhid ja nende kasutamine.

(3) Полупроводники в науке и технике, т.І.

(4) Полупроводники в науке и технике, т.ІІ.

(5) Применение полупроводников в приборостроении, Труды конференции, 1958 г.

1. Tõkke-kihiga fotoelemendid ja fotodioodid.

(1) - lk. 176-181. (Lisamaterjalina võib kasutada

1) - lk. 385-405). (4) - lk. 154-157, (2) - lk.94-99.

ingimata läbi töötada (1) - lk.176-181 ja (4) -lk.154-157.

Fotoelektromotoorse jõu tekkimise põhjuseks on valguse

poolt genereeritud elektron-aurk paaride lahutamine kontakt-
välja poolt p-n üleminekus. Tähendab fotoelektromotoorse jõu
tekkimisele annavad oma osa elektron-aurk paarid, mis asuvad
p-n üleminekust mitte kaugemal kui difusioonikaugus (sellised
paarid jõuavad enne rekombineerumist p-n üleminekuni, kus nad
lahutatakse - elektronid n-piirkonda ja augud p-piirkonda).
Paaride lahutumise tulemusena laadub p-piirkond positiivselt,
n-piirkond negatiivselt, järelikult väheneb potentsiaalne bar-
jäär n- ja p-piirkondade vahel. Statsionaarsel valgustamisel
väheneb potentsiaalne barjäär suuruseni, mil otsevool muutub
võrdseks paaride elektron-aurk "lahutamissooluga". Otsevoolu
antud barjääri kõrguse juures võib vähendada temperatuuri alan-
damisega (madalatel temperatuuridel on elektronide energia
väga väike, selleks et ületada barjääri p-n üleminekus otse-
suunas) ja tänu sellele on praktiliselt võimalik saavutada
fotoelektromotoorseid jõude, mis on lähedased potentsiaalse
barjääri suurusele p- ja n-piirkondade vahel.

Pöörata tähelepanu veel teistele faktoritele peale tempe-
ratuuri, mis mõjuvad fotoelektromotoorse jõu suurusele (mater-
jalide oomilisus, elemendi mõõted, pinnaomadused jne.).

Praktilise rakenduse seisukohalt on oluline teada reaalse
fotoelemendi ekvivalentset skeemi ja dünaamilisi karakteristi-
kuid ((4) - lk. 154-157).

Fotoelemendi tööil põhineb ka päikeseenergia muundamine
elektrienergiaks nn. päikeseapariteides (vt. (4) - lk.189).

2. Termistorid.

(1) - lk. 408-411.

(2) - lk. 99-109.

(5) - lk. 17-36.

Põhiline tähelepanu pöörata termotakistite volt-ampere-
karakteristikutele ja tööprintsipidele mitmesugustes seadis-
tes (5) (temperatuuri kompensator, pingestabilisaator,
võimsuse mõõtmise kõrgetel sagedustel).

3. Fototakistid.

(1) - lk. 405-407.

(3) - lk.339-351; 361-366.

Fototakistite töö põhineb nn.sisemisel fotoefektil (juh-

tivuse suurenemine pooljuhi valgustamisel). Bespool esitatud kirjanduse (3) lugemisel pöörata tähelepanu fotojuhtivuse füüsikale, fototakistite tähtsamatele karakteristikutele (integraalne ja spektraalne tundlikkus, volt-amper-karakteristik, ajakonstant, pimetakistuse suhe valgustakistusesse, luks-amper-karakteristik).

Konkreetsetest fototakistitest teada lähemalt kadmium-sulfiid-fototakistite omadusi.

4. Varistorid.

(1) - lk. 411-416.

(3) - lk. 318 ja lk. 331-336.

Nõutav on teada kahte võimalikku mehhanismi voolu läbimisel SiC takistitest, mis seletavad mittelineaarse volt-amper-karakteristiku olemasolu. Samuti peab olema ettekujutus varistorite kasutamisest praktikas (näidatud kirjanduse ulatuses).

5. Halli efekti kasutamine tehnikas.

(1) - lk. 416-420.

(5) - lk. 147-157.

Halli efekti kasutamise kohta on vaja teada printsiibis järgmised küsimused:

- 1) Magnetväljade tugevuse mõõtmine (eelised teiste mõõtmisviisidega võrreldes).
- 2) Voolutugevuse ja võimsuse mõõtmine alalis- ja vahelduvvoolu ahelates.
- 3) Signaalide muundamine. Vahelduva pinge detekteerimine ja moduleerimine.
- 4) Sageduse analüsaatori töö põhimõtte.
- 5) Signaalide võimendamine ja võnkumiste genereerimine.

6. Pooljuhtide termoelekter.

(2) - lk. 36-42; 109-113.

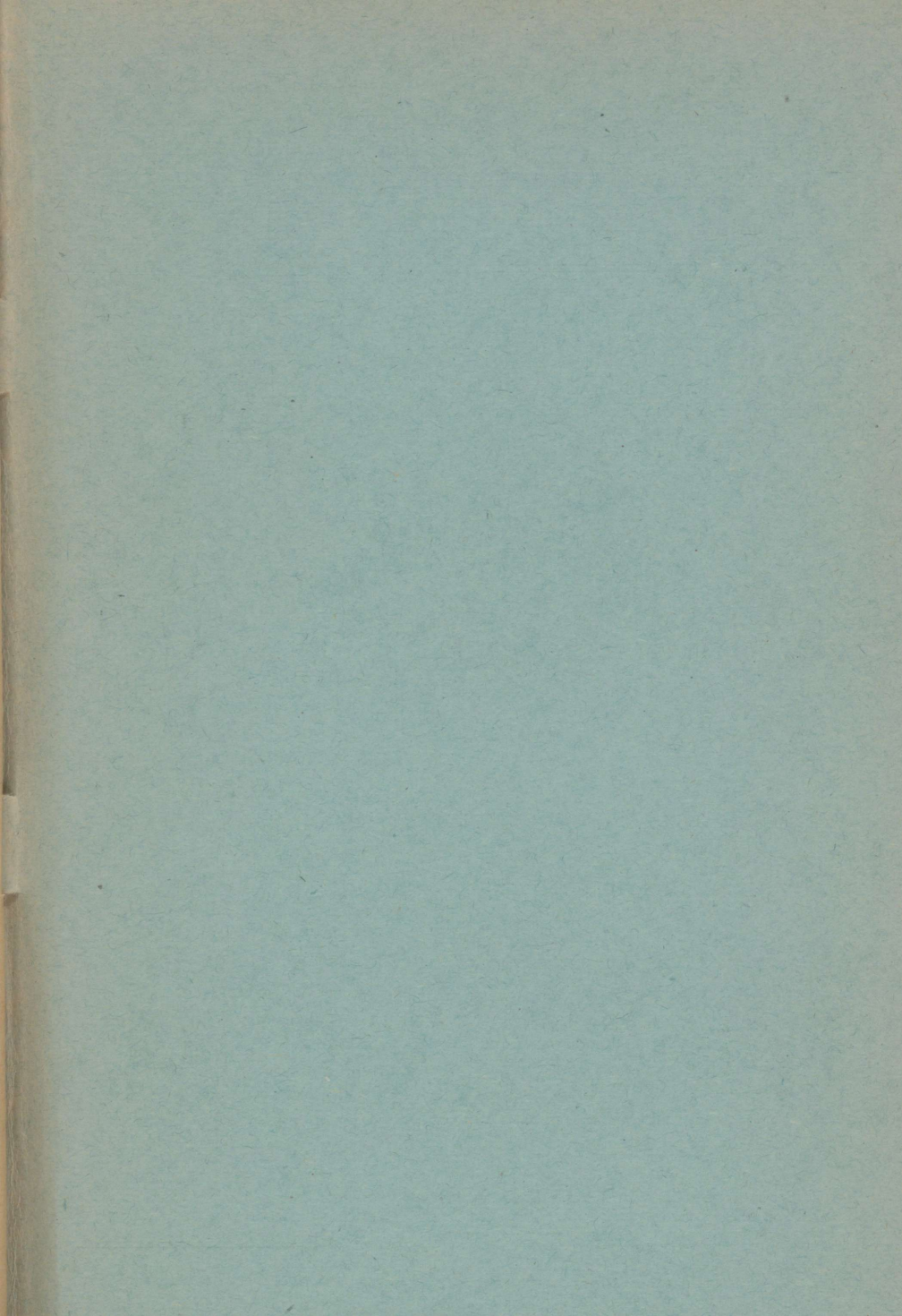
(3) - lk. 113-118.

Siin on vaja teada füüsikalisi protsesse, mis kutsuvad esile termoelektromotoorse jõu tekkimise ning Peltier' ja Tomsoni efektide olemust (lk. 113-118 (3)).

Samuti peab olema ettekujutus termoelektrogeneraatori tööst ja Peltier' efekti kasutamisest külmutusseadmetes.

SISUKORD.

U.Nõmm		lk.
	Bessõna	3
	I.Sissejuhatus	5
	II.Gaaside omadused sõltuvalt vaakuumi astmest	5
	III.Vaakuumpumpe põhikarakteristikud	7
	IV. Torude ja avade juhtivus ning vaakuumtehnika	8
	põhivõrrand	
	V. Õli-rotatsioonpumpadest	12
	VI.Difusioonpumpadest	14
	VII.Vaakuummõõtmistest	16
	VIII.Vaakuumaurustamine	18
	Kirjandus	23
P.Lõuk		
	Bessõna	24
	I. Sissejuhatus	25
	II. Põhimõisted pooljuhtide füüsikast	26
	III. Ge elektrilised omadused	37
	IV. Elektronide jaotus energia järgi	40
	V. Väljumistöö ja kontaktpotentsiaalide vahe	41
	VI.Pooljuhtdiodid	44
	VII.Pooljuhttrioidid	48
	VIII.Mitmesuguseid pooljuhtide rakendusi.....	49



Tasuta

A

24175

190390

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00359597 4