

Tartu Ülikool
Materjaliteaduse Instituut

Eksperimentaalfüüsika magistrikursus

Krüotehnika

A. Lukner, I. Sildos, V. Kiisk

Tartu 2011

1. LÜHIÜLEVAADE TEOORIAST	3
1.1. Elektri juhtivuse olemus.....	3
1.2. Elektri juhtivuse temperatuurisõltuvus	4
1.3. Ülijuhid	5
1.4. Kirjandus	6
2. PRAKTILINE TÖÖ	7
2.1. Töö eesmärk	7
2.2. Tööülesanne	7
2.3. Töövahendid.....	7
2.4. Krüostaadi ehitus ja tööpõhimõte	7
2.5. Krüosüsteemi ettevalmistamine mõõtmisteks.....	9
2.6. Töö käik	12
2.7. Tulemuste analüüs.....	12

1. LÜHIÜLEVAADE TEOORIAST

1.1. Elektri juhtivuse olemus

Empiirilisest kogemusest on teada, et paljudes materjalides (nt metallides) tekib elektrivälja toimel laengute ümberpaiknemine, mis avaldub elektrivooluna. Seejuures voolutugevus on võrdeline rakendatud potentsiaalide vahega (Ohmi seadus). Seda nähtust on võimalik üpris lihtsalt põhjendada nii klassikalise kui ka kvantteooria valguses.

Klassikalise (Drude-Lorentzi) mudeli kohaselt eksisteerib elektrijuhtis märkimisväärses koguses laengukandjaid (elektrone), mis ei ole ühegi aatomiga seotud ja saavad vabalt liikuda kogu kristalli ulatuses. Elektrivälja rakendamisel hakkavad nad kiirenevalt liikuma kuni pörkuvad mõne võresõlmes asuva iooniga. Peale pörget omandab elektron juhusliku kiiruse ja liikumissuuna ning kaotab seeläbi kogu esialgse suunatud liikumise energia. Seejärel protsess kordub. Keskmiselt triivib elektron siiski elektrivälja E suunas mõnesuguse *triivikiirusega* v , mis on võrdeline E -ga: $v = \mu E$. Võrdetegurit μ nimetatakse laengukandja *liikuvuseks* ja see on määratud keskmise ajavahemikuga kahe järjestikuse pörke vahel (nn. relaksatsiooniajaga). Kui juhtivuselektronide kontsentratsioon on n , siis voolutihedus avaldub järgmiselt:

$$\mathbf{j} = env = en\mu\mathbf{E}.$$

Võrdetegurit $\sigma = en\mu$ nimetatakse aine *erijuhtivuseks* ja tema pöördväärtust $\rho = 1/\sigma$ aine *eritakistuseks*. Heade elektrijuhtide (vask, hõbe) eritakistused on $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ suurusjärgus, korralikes isolaatorites (teflon) aga $10^{24} \Omega \cdot \text{m}$. Pikkusega L ja ühtlase ristlõikega S elektrijuhi takistuse võib leida koolikursusest tuntud valemiga:

$$R = \rho \frac{L}{S}.$$

Elektrijuhtivuse kvantkäsitlus lähtub elektroni liikumisest kristalli perioodilises potentsiaaliväljas. Nagu kvantmehaanikas näidatakse, on perioodilises potentsiaaliväljas liikuva elektroni energiatasemed koondunud tsoonideks, mis on üksteisest eraldatud vahemikega, kus energiatasemed puuduvad. Kristalli tsoonistruktuur määrabki esmajärjekorras materjalide liigituse elektrijuhtivuse mõttes. Elektronid on fermionid, seega iga energiataseme võib hõivata kuni kaks vastassuunalise spinniga elektroni. Tsoon, kus kõik energiatasemed on elektronidega täidetud, ei anna mingit panust elektrijuhtivusse, kuna laengukandjad ei saa elektrivälja toimel siirduda kõrgema energiaga olekusse (need on juba hõivatud). Dielektrikute korral on kõik elektrone sisaldavad tsoonid täielikult täidetud. Kõrgeimat elektronide-

ga täidetud tsooni nimetatakse *valentstsooniks* (see on moodustunud aatomite valentsorbitaalidest), sellele järgnevat tühja tsooni aga *juhtivustsooniks*. Metallide puhul aga kõrgeim elektrone sisaldav tsoon (juhtivustsoon) on vaid poolenisti täidetud, mis tingibki metallide hea elektrijuhtivuse. Pooljuhid on oma tsoonistruktuuri poolest sarnased dielektrikutele, kuid energiavahemik valents- ja juhtivustsooni vahel on nii väike (tüüpiliselt < 3 eV), et võrevõnkumised suudavad ka toatemperatuuril ergastada väheses koguses elektrone valentstsoonist juhtivustsooni. Seega nende elektrijuhtivus on metallide ja dielektrikute vahepealne.

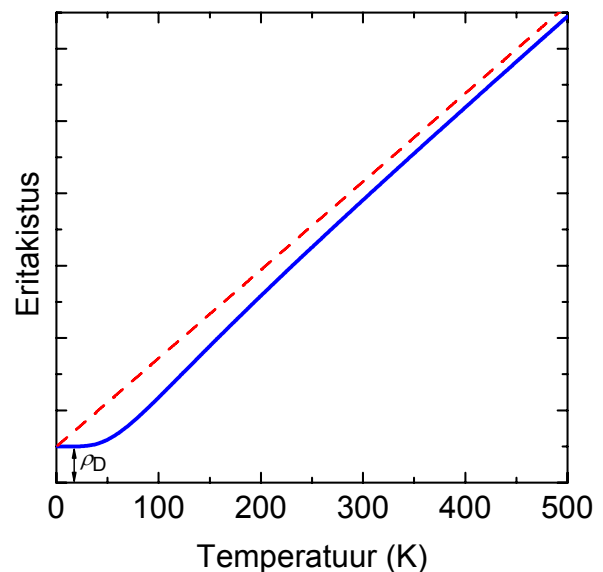
Erinevalt klassikalisest teoriast ennustab kvantteooria, et ideaalses staatilises kristallvõres ei tohiks elektronide liikumist miski takistada. Elektritakistuse tegelikuks põhjuseks on staatilised või dünaamilised kõrvalekalded kristallvõre ideaalsusest, st defektid (kas siis struktuurdefektid või lisandiatomid) ja kristallvõre võnkumised. Vastavalt ka aine eritakistuse saab lahutada kahte ossa: $\rho = \rho_D + \rho_V$, kus ρ_D iseloomustab defektide panust ja ρ_V iseloomustab võnkumiste panust. Seda nimetatakse *Matthiesseni seaduseks*. Absoluutsel nulltemperatuuril peaks puhta ideaalse kristalli elektritakistus olema null.

1.2. Elektrijuhtivuse temperatuurisõltuvus

Metallid. Defektidest tingitud panus ρ_D Matthiesseni seaduses on temperatuurist praktiliselt sõltumatu (määratud defektide kontsentratsiooniga). ρ_V aga kasvab temperatuuriga vastavalt sellele kuidas kasvavad kristallis aatomite võnkeamplituudid, so. ergastatud võnkekvantide (foononite) arv. Võib näidata, et kui foononite jaotus allub Debye mudelile¹, on ρ_V määratud järgmise, nn. Blochi-Gruneisseni valemiga:

$$\rho_V(T) = A \left(\frac{T}{\theta} \right)^5 \int_0^{\frac{\theta}{T}} \frac{x^5}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})} dx.$$

θ on parameeter, mis on küllalt lähedane Debye temperatuurile, ning A on võrdetegur, mis sõltub muudest aine omadustest. Selle mudeli järgi arvatud tüüpiline $\rho(T)$ sõltuvus on kujutatud kõrvaloleval graafikul. Kõrgetel temperatuuridel ($T \gg \theta$) taandub see lineaarsõltuvusele (veenduge selles!):



¹ Debye mudel käsitleb kristallvõre võnkumisi madalsageduslikus lähenduses, so. akustiliste lainetena. Debye temperatuur θ iseloomustab võnkumiste maksimaalset sagedust ν_{\max} läbi seose $kT = h \nu_{\max}$.

$$\rho_V(T) = (A/4) \frac{T}{\theta}.$$

Pooljuhid. Pooljuhis suudavad võrevõnkumised ka toatemperatuuril ergastada väheses koguses elektrone valentstsoonist juhtivustsooni. Selline üleminek on seda tõenäolisem, mida kõrgem on temperatuur, nii et pooljuhtidel, vastandina metallidele, elektrijuhtivus kasvab temperatuuriga. Isepooljuhi (so. pooljuht, mis ei sisalda juhtivust muutvaid lisandeid) korral võib eritakistuse temperatuurisõltuvust kirjeldada esimeses lähenduses valemiga

$$\rho(T) = \rho_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}},$$

kus E_g on keelutsooni laius. Paneme muuseas tähele, et kui metallide puhul tulenes $\rho(T)$ sõltuvus põhiliselt laengukandjate liikuvuse (μ) muutusest, siis pooljuhi korral annab põhipanuse hoopis laengukandjate kontsentratsiooni (n) muutumine.

Pooljuhtide tehnoloogilise rakendamise aluseks on võimalus nende elektrilisi omadusi suures ulatuses tüürida mitmesuguste lisandite sisseviimise teel. Käesolevas me aga piirdume isepooljuhi uurimisega.

1.3. Ülijuhid

Elavhõbeda ülijuhtivuse avastas Kamerlingh Onnes 1911 aastal. Ülijuhtivuse elementaarse teooria löid Bardeen, Cooper ja Schrieffer aga alles 1957 aastal, mis ilmestab nähtuse keerukat iseloomu. BCS teooria järgi on ülijuhtivus makroskoopiline kvantefekt.

Ülijuhtivuse aluseks on elektroni interaktsioon kristallvõre positiivsete ionidega. Kristallis liikuv elektron tingib oma kuloonilise välja tõttu lokaalse ajutise võredeformatsiooni, mis liigub elektroniga kaasa. See deformatsioon omakorda võib avaldada toimet mõnele teisele elektronile. Selle tulemusena tekib kaudne tõmbejõud kahe vastassuunalise spinniga elektroni vahel. Sellele jõule toimib loomulikult vastu kulooniline tõukejõud nende elektronide vahel. Konventsionaalne ülijuhtivus esinebki BCS teooria kohaselt sellistes ainetes, kus kristallvõre vahendusel toimiv kaudne elektron-elektron interaktsioon on tugevam kui kulooniline tõukejõud, nii et elektronid moodustavad nn. Cooperi paare. Cooperi paaride liikumisele kristallvõre takistust ei avalda. Cooperi paari lõhkumiseks on tarvis kulutada mõnesugune hulk energiat. Absoluutsest nullist kõrgematel temperatuuridel on selle energia allikaks kristallvõre võnkumised. Võib näidata, et ülijuhtivust tingivate elektronide kontsentratsioon varieerub temperatuuriga järgmiselt:

$$n_s(T) = n_s(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right].$$

Kriitilisest temperatuurist T_c kõrgematel temperatuuridel ülijuhtivus kaob. T_c on reeglina väiksem kui 20 K. Enamus metalle ning mitmed sulamid ja pooljuhid käituvad ülijuhtidena küllalt madalatel temperatuuridel.

Alates 1986 a. on leitud rida spetsiifilisi ülijuhtmaterjale, mille T_c on märgatavalt kõrgem kui 20 K. Kõrgtemperatuurse ülijuhtivuse olemus ei ole siiani veel täielikult selge. Kõige prominentsemad kõrgtemperatuursed ülijuhid on mitmesugused kupraadid (vaske sisaldavad ühendid), mille T_c ületab juba tunduvalt vedela lämmastiku keemistemperatuuri (77 K).

1.4. Kirjandus

- I. Saveljev, Füüsika üldkursus II.
- L. Solymar, D. Walsh, Lectures on the Electrical Properties of Materials.
- E. O'Reilly, Quantum Theory of Solids.
- C. Kittel, Introduction to Solid-State Physics.
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Resistivity>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Debye_model

2. PRAKTILINE TÖÖ

2.1. Töö eesmärk

Eksperimentaalse krüotehnikaga tutvumine He-4 optilise krüostaadi baasil. Ainete elektrijuhtivuse ja selle temperatuurisõltuvuse uurimine.

2.2. Tööülesanne

Erineva iseloomuga elektrijuhtide – metalli (vase), pooljuhi ja ülijuhi (Nb-Ta sulami) – elektritakistuse temperatuurisõltuvuse mõõtmine ja modelleerimine temperatuurivahemikus 4 K–300 K.

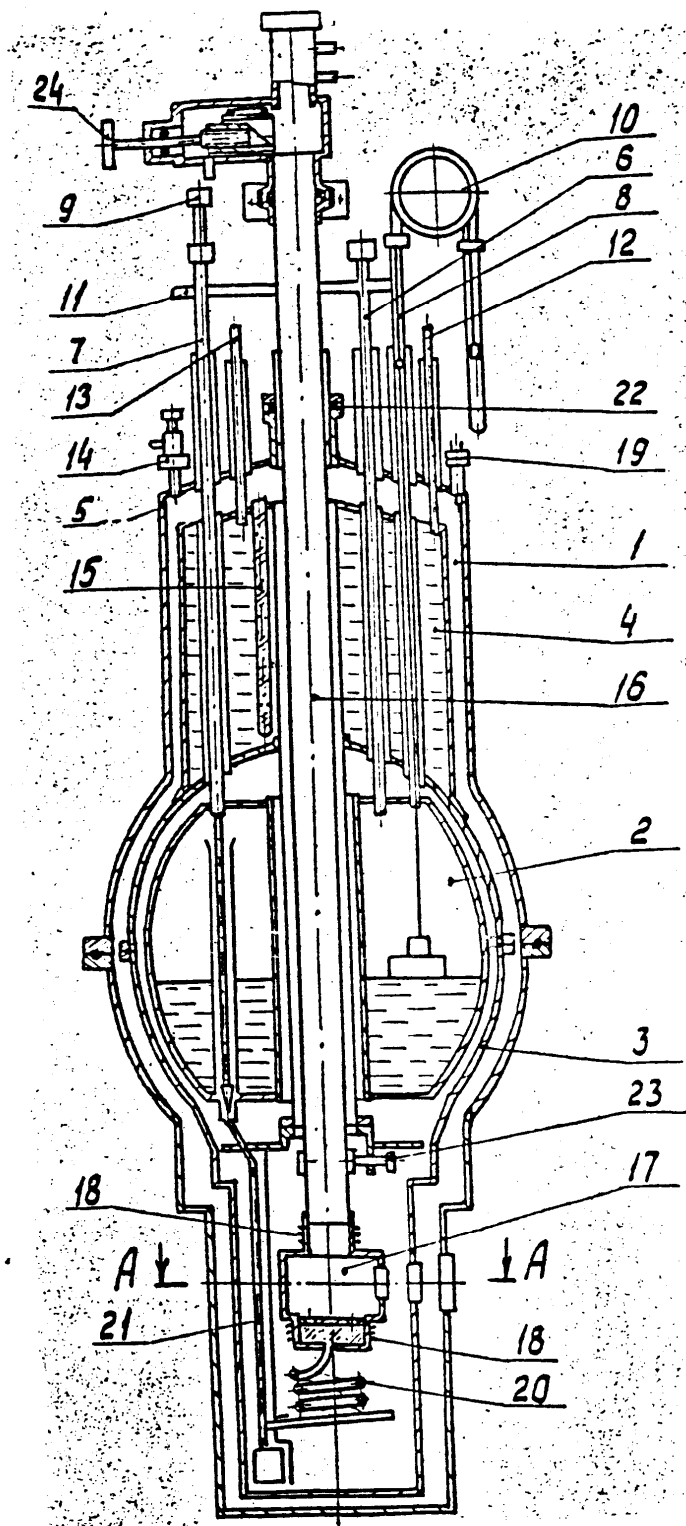
2.3. Töövahendid

He-4 krüostaat (UTREKS-LSO), temperatuurikontroller, gaasivooluregulaator koos manostaadiga, ühendusvoolikud, multimeeter (FLUKE-175).

2.4. Krüostaadi ehitus ja tööpõhimõte

Antud krüosüsteem koosneb kolmest komponendist: krüostaadist, temperatuurikontrollerist ja gaasivooluregulaatorist (viimasega on kokku ehitatud ka manostaat). Tegemist on UTREKS-LSO tüüpi optilise krüostaadiga, mis on põhiliselt ette nähtud optilisteks mõõtmisteks temperatuurivahemikus 1.5 K – 4.2 K (vedelas heeliumis) või 4.2 K – 300 K (He aurudes). Käesolevas töös kasutatakse teda aga elektrilisteks mõõtmisteks.

Krüostaadi ehitus on kujutatud joonisel 1. Vertikaalse toru kujuline objektiruum 17 on koaksiaalselt ümbritsetud vedela He (LHe) anumaga 2, mille kohal paikneb vedela N₂ (LN₂) nõu 4. LHe anum on omakorda ümbritsetud LN₂ temperatuuril hoitava vasest ekraaniga 3, mis aitab vahendada soojuskiirguse levimist. Süsteem on väliskeskkonnast isoleeritud vaakumsärgiga 1. Vaakumruum on ka LHe nõu ja LN₂ nõu vahel. Vaakumi kvaliteeti aitab parandada süsinikadsorber 15, mis krüostaadi allajahutamisel adsorbeerib järelejäänud õhumolekulid. Objektiruumi on võimalik juhtida vedelat He läbi avause, mida kontrollitakse keermetatud nõelteravikuga 7, mida saab kinni/lahti keerata pea 9 abil. Toru 21 kaudu saab läbi objektiruumi tekitada He-gaasi läbivoolu. Soojuskiirguse vähendamiseks on kõik krüostaadi sisepinnad poleeritud või kaetud peegeldava kattega. Uuritav objekt riputatakse varda abil soovitud kõrgusele (akende suhtes), kusjuures kõik vajalikud ühendusjuhtmed (temperatuurisensorisse jm.) peavad olema koos objektihoidjaga teisaldatavad.



Joonis 1. Krüostaadi konstruktsioon. 1) krüostaadi vaakumruum; 2) LHe reservuaar; 3) LN₂ temperatuuril olev vaskekraan; 4) LN₂ reservuaar; 5) krüostaadi välissein; 6) LHe reservuaari täitistoru; 7) nõelteravik, mis kontrollib LHe juurdepääsu objektiruumile; 8) ujuk LHe taseme mõõtmiseks reservuaaris; 9) nõelteraviku (7) reguleerimise pea; 10) ujuki (8) blokkülekanne vastukaalule; 11) LHe reservuaari täiteavasid ühendav O-toru; 12) N₂ väljapääsuava; 13) LN₂ reservuaari täiteava; 14) ventiil krüostaadi vaakumruumi tühjaks pumpamiseks; 15) vaakumruumi süsinik-adsorber; 16) objektiruumi šaht; 17) objektiruum; 18) küttekehad objektiruumi soojendamiseks; 19) vaakumruumi avariiventil; 20) toru LHe pääsemiseks objektiruumi; 21) toru He-gaasi pääsemiseks objektiruumi; 22) O-ring tihend objektihoidja kinnitamiseks; 23) liugklapp autonoomseks objektiruumi sulgemiseks; 24) liugklapp autonoomseks objektiruumi šahti sulgemiseks.

Katseobjekti temperatuuri kontrollimiseks on kaks teed. Temperatuuri alandamiseks tekitatakse külma He-gaasi voolu läbi objektiruumi. Temperatuuri tõstmiseks gaasivool peatatakse ning soojendatakse küttekehaga objektiruumi seinu. Vooluhulka reguleeritakse gaasivoolukontrolleri ja manostaadiga. Manostaat tagab vajaliku ülerõhu LHe reservuaaris. Manostaat kujutab enesest reguleeritava vedrumehhanismiga klappi, mis tagab konstantse rõhu manostaadiga ühendatavas transportliinis. Gaasivooluregulaator koosneb kahest peenreguleeritavast

klapist, millest üks on manuaalselt kontrollitav ja teine elektromagnetiline automatiseeritud kontrolliks temperatuurikontrolleri poolt.

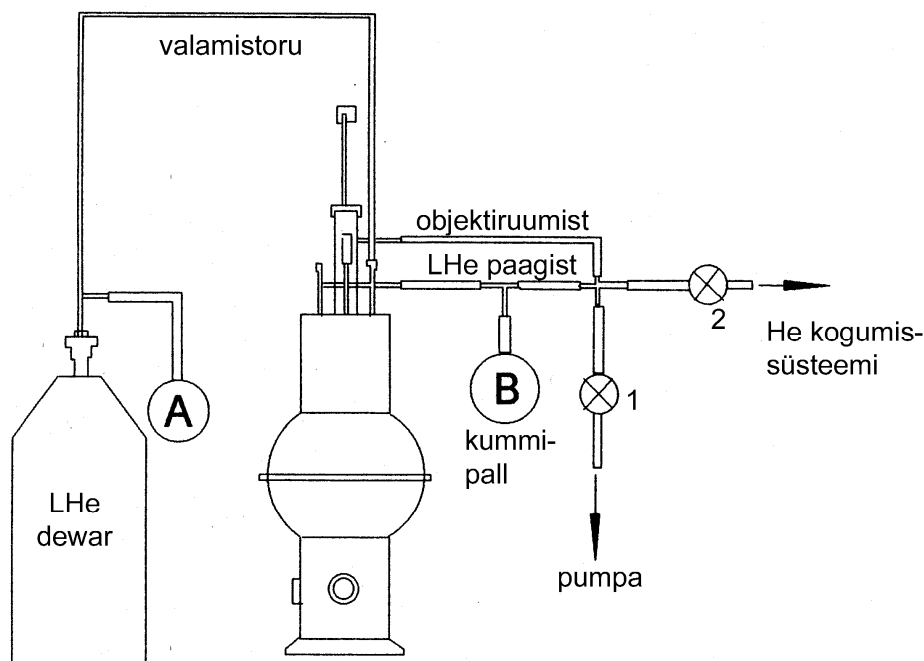
2.5. Krüosüsteemi ettevalmistamine mõõtmisteks

Esimese sammuna evakueeritakse vaakumruum tavalise õlirotatsioonpumbaga rõhuni $\sim 10^{-3}$ mbar. Vaakumpump ühendatakse krüostaadiga ventiili 14 kaudu. Enne ventiili avamist laske pumbal evakueerida 5–10 min jooksul ühendustorustik, seejärel avage aeglaselt ventiil. Vajaliku vaakumi saavutamiseks tuleb nüüd pumbata u. 2 tundi. Peale seda sulgege esmalt ventiil ja alles siis eemaldage ühendustorud.

Hoiatus. Peale krüostaadi mahajahutamist ei tohi eelmainitud ventiili avada, sest äkiline soojavoog krüostaati toob kaasa krüovedelike plahvatusetaolise aurustumise, mis võib kahjustab nii krüostaati kui ka temaga opereerijat!

Järgnevalt on tarvis evakueerida objektiruumist ja sellega ühenduses olev LHe reservuaarist õhk ja veeaur. Selleks tuleb koostada ühendusskeem, mis on kujutatud joonisel 2. Veenduge, et kõik kummivoolikud ja kummipallid on korralt ühendatud ja kraanid 1 ning 2 suletud. Seejärel tuleb pump sisse lülitada, avada ettevaatlikult kraan 1 ja pumbata süsteemi u. 10 min. Edasi kraan 1 suletakse ja avatakse He kogumise magistraali kraan 2, mille tulemusena süsteem täitub puhta He-gaasiga. Et tagada süsteemis maksimaalne puhtus, võib seda protseduuri korrata 2–3 korda. Peale viimast evakueerimist ja He-gaasiga täitmist tuleb pump välja lülitada, lahti ühendada ning lasta sellesse õhk sisse.

Nüüd on krüostaat valmis LN₂-ga täitmiseks. LN₂ valamise asetatakse avausse 13 lehter. LN₂ juurdevalamist jätkatakse seni kuni üleliigne vedelik hakkab läbi avause 12 välja purskuma. Seejärel tuleks u. 30 min oodata kuni krüostaat on kindlalt maha jahtunud LN₂ temperatuurile ning vajadusel veel LN₂ juurde valada.



Joonis 2. He transpordi ja kogumisskeem krüostaadi ettevalmistusetapil ja järgneval LHe valamise ajal.

Hoiatus. Krüovedelikega (eriti LN_2) ümberkäimisel tuleb arvestada järgnevate ohtudega. Krüovedelik, sattudes nahale või riieteile, võib põhjustada pöördumatuid koekahjustusi. Samuti tuleb arvestada sellega, et krüovedeliku valamisel LN_2 dewarist toatemperatuuril olevasse krüostaati kaasneb intensiivne vedeliku aurustumine ja sellega seoses suure hulga pritsmete teke.

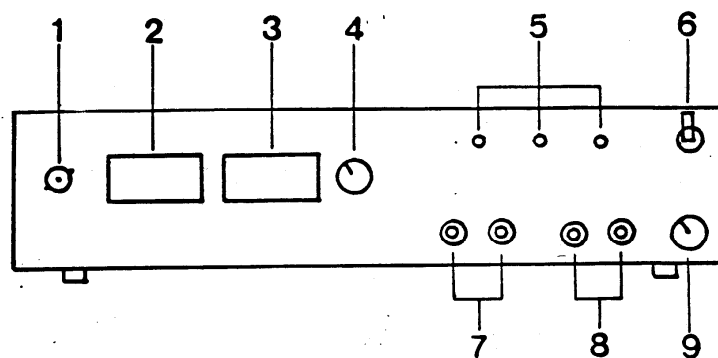
LHe valamiseks transportdewarist krüostaati kasutatakse spetsiaalset valamistoru (joon. 2), mis koosneb kahest kontsentrisest torust, mille vahel olev ruum on hermeetiliselt suletud. Selles vaheruumis olev õhk veeldub LHe läbivoolamise ajaks ja tekib vaakum. LHe valamisel mängivad olulist rolli kummipallid A ja B, mis inditseerivad ülerõhku süsteemis ja on ühtlasi ka avariiventiliks liigse ülerõhu tekkimisel.

Enne valamise alustamist tuleb veenduda, et He kogumise magistraali kraan 2 on avatud, transportdewari ning krüostaadi täiteavad on enam-vähem ühel kõrgusel ning LHe reservuaaris oleva ujuki plokkülekanne töötab (viimast saab ettevaatlikult kontrollida magnetiga). Vabastades fikseerivad mutrid, eemaldame metallist/eboniidist punnid LHe transportdewarilt ja krüostaadi avalt 6. Seejärel ühendame avad valamistoruga (pikem õlg torust läheb dewarisse). Aeglaselt ja ühtlaselt langetades (hoides toru keskosa horisontaalselt), sisestame valamistoru peaaegu lõpuni LHe dewarisse. Valamistoru kokkupuutel vedela heelumiga tekitatakse transportdewaris ülerõhk, mis sunnib LHe voolama krüostaati. LHe voolamist saab stimuleerida kummipalli A korduvalt surudes. Krüostaadi täielik täitumine võtab aega umbes 30 min. LHe valamise indikaatoriks on esialgu kum-

mipalli B silmnähtav tukslemine, mis on tingitud krüostaati jõudnud LHe aurustumisest. Edaspidi jätkata valamist jälgides LHe reservuaari ujuki näitu. Peale valamisprotseduuri lõppu ei maksa valamistoru eemaldamisel pikalt viivitada vältimaks toru kinnijäätumist.

Hoiatus. Juhul, kui valamise käigus krüostaadi välissein kattub härmatisega, tuleb valamine koheselt lõpetada! Sel juhul on tegemist gaaside lekkega krüostaadi vaakumruumi. Eemaldage valamistoru ja jätke järgmiseks 8 tunniks krüostaat kogumisliiniga ühendatuks, et süsteemi temperatuur normaliseeruks.

Peale LHe valamise lõpetamist tuleb kohale asetada ja kinni keerata nõel 7 (joon. 1) ning objektiruumist ja LHe paagist väljuvad torud ühendada kogumisüsteemiga läbi gaasivooregulaatori. Seejuures LHe paagist tulev voolik ühendatakse manostaadi sisendiga. Seejärel tuleb teostada elektrilised ühendused temperatuurikontrolleri, gaasivooregulaatori, krüostaadi küttekeha ja temperatuurisensori vahel. Temperatuurikontrolleri esipaneel on toodud joonisel 3. Temperatuurisensoriks on kalibreeritud termodiod, mõõdetakse diodil tekkivat pingelangu konstantse voolutugevuse juures.



Joonis 3. Temperatuurikontrolleri esipaneel. 1) termodiodi sisend; 2) termodiodi temperatuurinäit; 3) soovitatav temperatuur (sisestatakse manuaalselt kasutades näidiku all olevaid nuppe); 5) valgusdiodindikaatorid näitamaks kontrolleri töörežiimi (*UP* – soojendus, *DOWN* – jahutamine); 6) toitelüliti; 7) ühenduskontaktid elektromagnetilise klapi (*VALVE*) jaoks; 8) ühenduskontaktid küttekeha (*HEATER*) jaoks; 9) nupp küttekeha pingereguleerimiseks.

Hoiatus. Tuleb jälgida, et küttekeha toitepinge (muudetav nupuga 9) ei ületaks u. 75% maksimaalsest. Küttekeha pikaajaline hoidmine suurtel voolutugevustel põhjustab küttekeha mähiste isolatsioonkihi riknemise. Seetõttu on alati mugavam (kiirem) minna kõrgemalt temperatuuril madalamale, mitte vastupidi.

Peale eksperimendi lõppu tuleb krüostaat jätta jõudeolekusse. Kõigepealt tuleb välja lülitada ja lahti ühendada temperatuurikontroller. Juhul kui krüostaati on jäänud märkimisväärne kogus heeliumi, tuleb süsteem jätta ühendusse He kogumismagistraaliga (ja kraan 2 lahti). Seejuures otsevooluventiil jätta avatuks.

Vastasel juhul keerata He kogumismagistraali kraan kinni ning sulgeda gaasivooluregulaatori väljund Bunseni ventiiliga.

2.6. Töö käik

1. Paigutage objektihoidja koos uuritavate objektidega krüostaati.
2. Mõõtkte takistused toatemperatuuril.
3. Valmistage krüostaat ette madaltemperatuurseteks mõõtmisteks vastavalt eespool toodud juhendile:
 - Pumbake vaakumruum
 - Evakueerige õhk objektiruumist ja LHe reservuaarist ja täitke He-gaasiga
 - Täitke LN₂ reservuaar
 - Valage LHe
 - Ühendage süsteemi gaasivoolukontroller, manostaat ja temperatuurikontroller.
4. Alustage takistuste mõõtmist kõrgeimast olemasolevast temperatuurist (~250 K), liikudes temperatuuriga järjest madalamale. Temperatuuridevahemikus 270 K–50 K mõõta sammuga 20 K; vahemikus 50 K–20 K sammuga 10 K ja edasi (kuni 5 K) sammuga 1 K.
5. Kasutatud ühendusjuhtmete takistus määrata eeldusel, et ülijuhi takistus kriitilisest temperatuurist madalamatel temperatuuridel on praktiliselt null.
6. Mõõtmiste lõpetamisel seadke krüostaat jõudeolekusse.

2.7. Tulemuste analüüs

1. Kirjeldage metalli jaoks mõõdetud $R(T)$ sõltuvust Blochi-Grüneisseni mudeliga

$$R(T) = R_D + A \left(\frac{T}{\theta} \right)^5 \int_0^{\frac{T}{\theta}} \frac{x^n}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})} dx,$$

otsides parameetritele R_D , A ja θ optimaalsed väärtused (Mathcad'is võib optimeerimisülesannete lahendamiseks kasutada funktsiooni **Minimize**; **genfit** kasutamine on tülikas, kuna $R(T)$ avaldis sisaldab integraali). Võrrele leitud θ väärtust vase Debye temperatuuriga.

Kasutatud vasktraadi diameeter on 0.12 mm ning eritakistus toatemperatuuril $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Määrake traadi pikkus.

2. Joonestage pooljuhi jaoks mõõdetud $R(T)$ sõltuvus (temperatuurivahemikus, kus seda oli võimalik mõõta) skaalas $1/T - \ln(R)$ ja lähendage seda sirgega, mis tuleneb valemist

$$R(T) = R_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}.$$

Hinnake sel teel pooljuhi keelutsooni laiust E_g . Viimane tuleb väljendada elektronvoltides.

3. Joonestage ülijuhi $R(T)$ sõltuvus ja näidake sellel kriitiline temperatuur.

Praktikumitöö protokoll tuleb saata juhendajale e-posti teel või paber kandjal.