

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL
Eksperimentaalfüüsika
kateeder

RÖNTGENKIIRGUSE MOJUL
TEKITATUD JUHTIVUSE UURIMISEST
LEELISHALOGENIIDFOSFOORIDES

Diplomitöö

Töö teostaja: Arnold Rosental,
füüsika osakonna V k.
üliõpilane.

Töö juhendaja: ass. T. Soovik,
eksperimentaalfüüsika
kateeder.

Tartu 1961

S i s s e j u h a t u s

Leelishalogeniidkristallide ergutamisel ioniseerivate kiirgustega tekistatakse neis vabu elektrone ja auke. Vabade laengukandjate edaspidises käitumises on määrav osa haardetsentritel, milleks võivad olla kristalli mikrodefektid või nende kompleksid. Vastasmärgiliste laengukandjate vahel, mis on lokaliseerunud üksteisest ruumiliselt eraldatud haardetsentritel, puudub otsene rekombineerumise võimalus. See tingib kristalli ergutatud oleku püsivuse. Et ergutus kaoks, on laengukandjatel vaja uuesti vabaneda, mida võib stimuleerida näiteks soojus- või valgusenergia. Ülemineku- protsessidega kaasnevate nähtuste uurimine aga annab meile rea meetodeid, mis võimaldavad tunnata õppida haardetsentreid.

Peatume lähemalt mõningatel nendest.

Vaatleme kahte liiki nähtusi: luminesents ja vool, ning kahte liiki stimuleerivat energiat: soojusenergia mitteisotermilises režiimis ja valgus-

energia.¹ Siis saame kuus kristallide uurimismeetodit:

1. termoväljakiiritamise meetod,
2. termovoolu meetod,
3. optilise sähvatuse meetod,
4. fotovoolu meetod,
5. termooptilise väljakiiritamise meetod,
6. fototermilise voolu meetod.

Määratleme siin lähemalt voolu /i/ mõõtmisel põhinevad meetodid. Luminestsentsi intensiivsuse /I/ mõõtmisel põhinevate meetodite puhul on spetsiifika sama, ainult voolutugevuse asemel mõõdetakse luminestsentsi intensiivsust.

Termovoolu meetod seisneb toatemperatuuril või madalamatel temperatuuridel ergutatud kristallide kuumutamise ajal saadava sõltuvuse i T määramises.

Fotovoolu meetodi puhul mõõdetakse voolu stimuleerimisspektrit i ergutatud kristalli kiiritamisel erinevate lainepikkustega valgusega.

Fototermilise voolu meetod põhineb mõlema eespool nimetatud meetodi ühendamisel. Ergutatud kristalli

1

Muidugi ei ammenda me sellega kaugeltki kõiki lähenemisvõimalusi üleminekuprotsesside uurimisele 1 .

temperatuuri tõstmise ajal valgustatakse teda lühikeste valgusimpulssidega, mis vastavad mõnele lisa-neeldumise ribale, ja määratakse .

Ajalooliselt on leelishalogeniidkristallide uurimisel voolu mõõtmisega seotud meetodid arenenud koos luminesentsi mõõtmisega seotud meetoditega, kuid on leidnud viimastest tunduvalt vähem kasutamist 2, 3 .

Käesoleva töö peaesmärgiks on meetoodika omandamine ja täiustamine voolutugevuse ja luminesentsi intensiivsuse paralleelseks mõõtmiseks leelishalogeniidkristallides. Selle kõrval on pööratud tähelepanu ka viimasel ajal saadud teoreetilistele tulemustele ja püütud neid kõrvutada saadud katseliste andmetega.

Vastavalt sellele on peale § 1-s antud üldise kirjanduse ülevaate voolu mõõtmisest leelishalogeniidkristallides § 2-s üksikasjalisemalt refereeritud Rebase ja Purga poolt 4, 5, 6, 7 arendatud teooriat seose kohta voolu ja luminesentsi intensiivsuse vahel kristalli termoväljakiiritamisel ja kirjeldatud teoreetiliste valemite praktilise rakendamise võimalusi. § 3 käsitleb katseseadet ja -metoo-

dikat. § 4-s esitatakse saadud eksperimentaal-
sed tulemused ja võrreldakse neid teoreetiliste
vahekordadega.

§ 1. Voolude mõõtmisest
leelishalogeniid -
kristallides.

Põhimõtteliselt toimub voolude mõõtmine kristallides järgmiselt. Uuritavale kristallile kantakse metallielektroodid. Üks elektroodidest ühendatakse pingelaadikaga, mille vastaspoolus on maandatud. Teine elektrod maandatakse läbi koormustakistuse. Mõõdetakse pingelaengu koormustakistusel. Voolude väiksuse tõttu leelishalogeniidkristallides kasutatakse mõõteriistana tavaliselt lampelektromeetrit. Mõõtmistel võetakse tarvitusele kõik ettevaatusabinõud, et likvideerida kõrvalnähtuste mõju.

Peatume siin vooluga kaasnevatel nähtustel leelishalogeniidkristallides.

Hakates kristallis välise välja mõjul triivima, indutseerivad vabad laengukandjad elektroodidel laengu, millega kutsuvad esile voolu kristalli vooluringis. Tuleb rõhutada, et vooluringis saame voolu ka siis, kui elektroodid pole otseses kontaktis kristalliga.

Kord tekitatud vabu laengukandjaid haaratakse haardetsentritesse, nad võivad sealt uuesti vabaneda, võivad rekombineeruda. Nende protsesside kogusuma

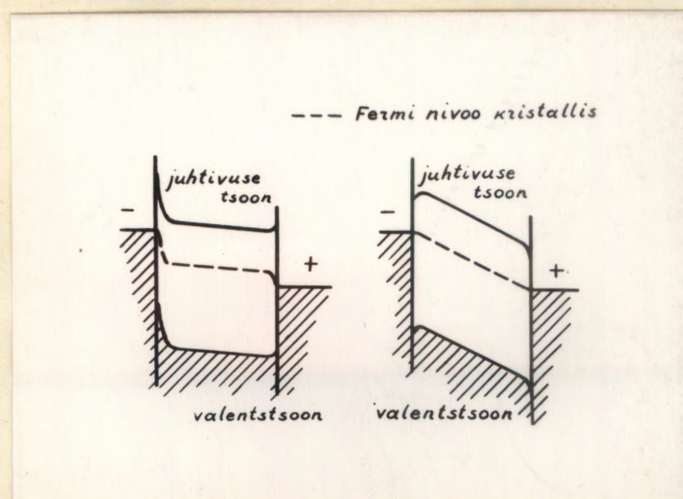
tingib mingi vabade laengukandjate kontsentratsioon
kristallis ja voolu kristalli vooluringis.

On selge, et kui tahame mõõta niimoodi tekkivat
voolu pikemat aega, siis peab olema võimalik laengu-
kandjate nihkest tingitud ruumlaengu pidev ja täielik
neutraliseerumine. Kui kristall pole kontaktis elek-
troodidega või kui kontaktid pole elektronide poolt
vabalt läbitavad /on mitteoomilised/, siis langeb ära
ruumlaengu neutraliseerimine võimalus elektroodide
kaudu. Efektiivne väli kristallis väheneb pidevalt
ja vool langeb lõpuks nullini.

Seega varjutavad ruumlaengu tekkimisega seotud
efektid meie eest otseselt vabade laengukandjate gene-
reerimise, kleepumise ja rekombineerimisega seotud
voolu kristallis. Käesolevas töös nimetame edaspidi
voolu mis on seotud ainult viimati mainitud nähtus-
tega kristallis, algvooluks.

Teatavasti on kontakt mitteoomiline kui kris-
tallis tekib elektroodi vahetus läheduses vabadest
laengukandjatest vaesem ala võrreldes muu kristal-
li osaga. Lisaks sellele, et mitteoomiline kontakt
takistab ruumlaengu neutraliseerimist, tingib ta
ka väljatugevuse ebaühtlase jaotuse kristallis.

Vaatleme joonist 1.



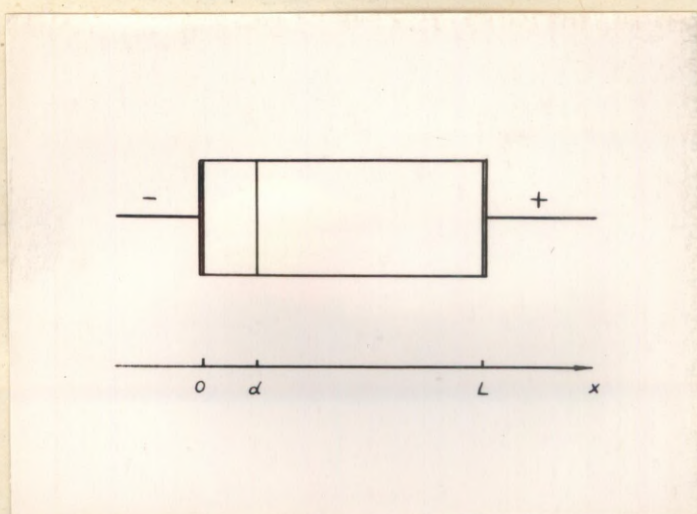
Joon. 1

Sel on kujutatud tsoondiagrammid, kui kristallile on rakendatud elektroodide kaudu pinge. Esimesel juhul on kontaktid mitteoomilised. Kogu pinge langeb kontaktide suurte takistustel. /Anoodkontakti takistus on väiksem katoodkontakti takistusest potentsiaalbarjääri kõrguse vähenemise tõttu./ Teisel juhul on kontaktid oomilised ja pinge langeb ühtlaselt kogu kristalli ulatuses. Sel juhul võime kergesti määrata väljatugevust kristallis.

Ekspereiment näitab 8, et tavaliselt pole leelishalogeniidkristallides, millele rakendatakse elektroodide kaudu pinge, väljatugevus jaotunud ühtlaselt. See viitab kontaktide mitteoomilisusele.

Vaatame nüüd ühe lihtsustatud näite varal, mida veel võib tingida mitteoomiline kontakt 9 .

Sisaldagu pingestatud kristall ainult F-tsentrid mis on ühtlaselt jaotatud. Kiiritame teda välja valgusvooga mis valgustab kogu kristalli ühtlase tugevusega. Elektronid saagu vabalt väljuda kristallist anoodkontakti kaudu, kuid mitte siseneda katoodkontakti kaudu. Teatud ajavahemiku möödudes saame siis kristallis järgmise pildi / joon.2/.



Joon. 2

Elektronide triivi tõttu anoodi poole tekib kristallis kaks piirkonda: katoodilähedane positiivse ruumlaenguga piirkond /I / ja ülejäänud kristalli osa /II/, milles väljatugevus on null ja puudub ruumlaeng.

Püüame arvutada katoodilähedase ala paksust.

Kui N on F-tsentrите tihedus ja e elementaarlaeng, siis saame välja kirjutada avaldise konstantse ruumlaengu liheduse jaoks I piirkonnas:

1.1

Seega

1.2

kus on dielektriline konstant.

1.2 integreerimine annab

1.3

II piirkonnas

1.4

ja

$$E_2 = \text{const} = 0.$$

1.5

Kogu kristalliile rakendatud pinge langeb piirkonnas I.

Siit

1.6

või kirjutades ümber

1.7

Väljatugevus omab maksimaalset väärtust katoodkon-

taktil

$$E_{\max} = \dots d . \quad 1.8$$

Hindame d ja E_{\max} . Kui $N = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\dots = 6$,
 $V = 1000 \text{ V}$, $L = 1 \text{ cm}$, siis

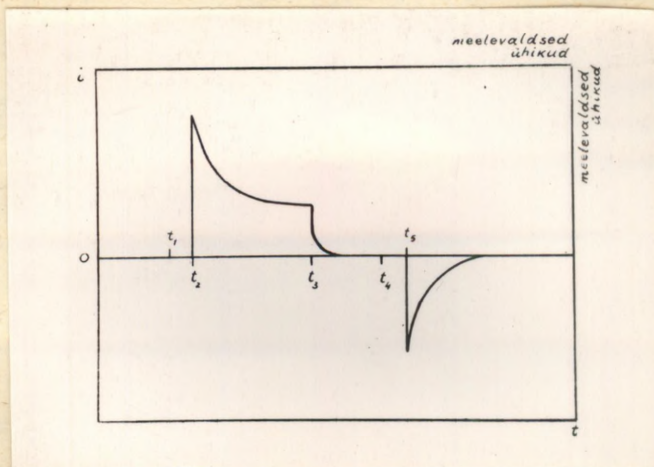
$$d = 8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

ja

$$E_{\max} = -2,4 \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{cm}} .$$

Juba palju väiksemate väljatugevuste korral esineb tugev elektronide külm-emissioon elektrodist kristalli. See lubab meil väita, et väli jääb katoodi lähedal väiksemaks arvutatud väärtusest ja et kristallis jääb voolama teatud vool ka pärast ruumlaengu moodustumist.

Eksperiment kinnitab seda. Tüüpilist voolu käitumist F-tsentrite fotolagundamisel kujutab joonis 3.



Joon. 3

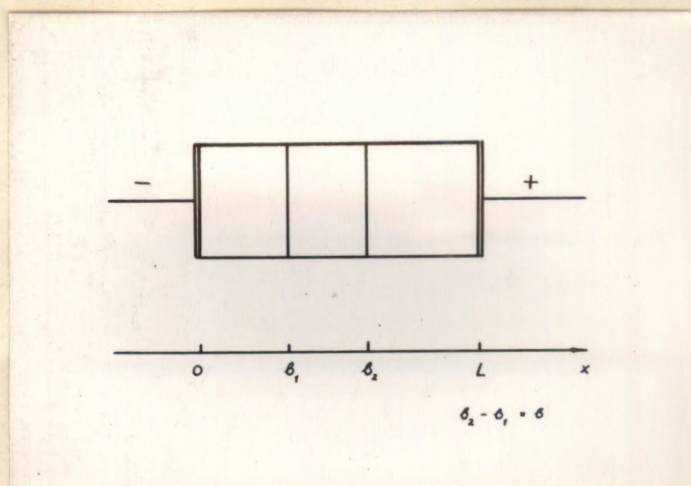
Joonisel on märgitud ajamomendid, millal teostatakse järgmised operatsioonid: t_1 - rakendatakse väli, t_2 - alustatakse valgustamist, t_3 - lõpetatakse valgustamine, t_4 - kõrvaldatakse väli, t_5 - alustatakse uuesti valgustamist.

Tuleb rõhutada, et kristalli kiire depolariseerimine on võimalik tema valgustamisel, samal ajal kui pimedas ja madalatel temperatuuridel võib kristall säilitada ruumlaengut küllalt kaua.

Polarisatsioon võib tekkida mitte ainult tõkestavate kontaktide korral, vaid ka vabade laengukanajate ebähtlasel genereerimisel kristallis.

Vaatleme järgmist erijuhtu 8 .

Olgu meil oomiliste kontaktidega homogeense F-tsentrite jaotusega kristall, millele on rakendatud pinge. Laseme langeda ühtlaselt neelduva stimuleeriva valgusvoe ainult kristalli keskossa /joon.4/.



Joon. 4

Siis analoogiliselt eelmisele näitele tekib valgustatud ala katoodipoolses osas positiivse ruumlaengu piirkond /võime vaadelda pinnana/. Ent nüüd moodustab anoodipoolse valgustamata ala ja valgustatud ala piirile ka negatiivse ruumlaengu piirkond.

Voolu kristalli vooluringis saame määrata järgmiselt.

Jätame arvestamata vabade elektronide pimekontsentratsiooni. Siis

1.9

kus on laengu pindtiheduse absoluutväärtus valgustatud riba lähedal, t on aeg, e on elementaariaeng, on elektroni liikuvus ja on ergutustihedus $/\text{cm}^{-3} \text{sek}^{-1}/$,

on elektronide keskmine eluiga valgustatud alas /loeme mitte sõltuvaks ajast/ ja E_D on väljatugevus valgustatud alas.

Edasi võime välja kirjutada

1.10

ja

1.11

kus E on väljatugevus valgustamata alas, on dielektriline konstant ja on laengu pindtiheduse absoluutväärtus elektroodidel.

Kristallile rakendatud konstante pinge võrdub

1.12

Võtame 1.11 ja 1.12 ajalised tulemused. Siis kasutades 1.9 saame

1.13

ja

$$= =$$

1.14

kus j on voolutihedus välisvooluringis.

Avaldise 1.13 integreerimine annab

1.15

kus

1.16

ja

$$T = \text{-----}$$

1.17

Siit saame lõpptulemuse

$$j = j$$

1.18

kus

$$j =$$

1.19

Valem 1.18 näitab, et vool kahaneb ajas eksponentsiaalselt. Saab näidata, et vabade elektronide pimekontsentratsiooni arvestamisel langeb vool eksponentsiaalselt nullist erineva konstantse väärtuseni 8.

Kaks eelnevat näidet on seotud ruumlaengu tekkimisega vabade laengukandjate stimuleerimisel tsentristest. On võimalik veel üks ruumlaengu tekkimise mehha-

nism 10, 11, 12 .

Kui näiteks elektroonse juhtivusega kristallile on pandud oomilised kontaktid, siis peaks ta teatud määral sarnanema vaakuumdiodiga, kuna kristallis on siis katoodi lähedal suur vabade elektronide tihedus nagu vaakuum diodiski. Pinge rakendamisel kristallile algab elektronide triiv anoodi poole. Kogu kristalli ulatuses tekib negatiivne ruumlaeng, mis määrab voolutugevuse. Esinevat voolu nimetatakse ruumlaengust piiratud vooluks. Sellel voolul on kristallis oma iseärasused võrreldes vaakuumdiodiga kristallis esinevate haardetsentrite tõttu. Kui haardetsentrid on tühjad ja asuvad nii sügaval, et soojusliikumine ei saa sealt elektrone vabastada, siis haaratud elektronid tekitavad seda tüüpi ruumlaengu, mis muudab voolu edaspidise voolamise võimatuks. Tagajärjeks on kristalli polariseerumine ka oomiliste konstantide puhul.

Siinkohal on võib-olla otstarbekohane märkida, et kristalli juhtivuse võib täielikult määrata tema struktuuri mittehomogeensus. Näiteks võivad olulist osa mängida üksikute kristalliplokkide kokkupuutekohtade omadused mosaiikkristallis, samuti dislokatsioonid.

Peatume veel voolu mõõtmismetoodikal leelishalogeniidkristallides.

Esineb polarisatsioon sundis otsima teid algvoolu määramiseks väikese veaga. Pohl 13,14 võttis esimesena fotovoolu mõõtmisel kasutusele impulssmetoodika. See metoodika põhineb järgmisel asjaolul. Kui kristallis stimuleerida vabu laengukandjaid lühikese ajavahemiku / 1 - 5 sek./ jooksul, kusjuures kasutatavad valgusvood ja kristallide värvumine on nõrgad, siis tekkinud ruumlaeng on kaduväike. Pidevalt korratavate mõõtmiste puhul depolariseeritakse kristall mõõtmiste vahel.

Ka depolarisatsioonivoolu mõõtmine impulssmeetodil 15 annab meile informatsiooni vahetult fotostimulatsiooni protsessidest.

Termovoolude mõõtmisel pole polarisatsiooni tekkimist uuritud. Termostimuleeritud algvoolu kõverate kuju täpsel määramisel on polarisatsiooni vältimine aga oluline. Tavaliselt on termovoolud väikesed ja võib olla tõsi, et sel juhul on ruumlaeng tähtsusetu.

Teine eesmärk, mis püstitatakse voolude mõõtmisel on polarisatsiooniprotsesside täpne tundmaõppimine. Siin kasutatakse loomulikult kestvat mõõtmisrežiimi.

Anname järgneva tabeliga /tabel 1/ ülevaate mõningatest töödest, milles mõõdetakse voolu leelishalogeniidkristallides.

Tabel 1

Meetod	Töö	Kristall	Mõõtmispiirkond	
termovool	16, 17	KCl, KBr	90 - 273°K	
	18	KCl	35 - 78°K	
	19	LiF	83 - 293°K	
	20	KBr	77 - 273°K	
	21	KCl-Te	110 - 340°K	
foto- vool	kestev režiim	8	NaCl	valge valgus
		9	KBr	valge valgus
		22	KCl	röntgenkiirgus
	impulss- režiim	13, 14	KCl, RbCl, NaCl	F-riba
		15	NaCl, KCl	F-riba
		23, 24, 25	KCl, KBr	500-1400m
		26	KCl	400-900 m
		27	NaCl, KCl, KJ, LiF	60 - 200 m
		14	KCl	röntgenkiirgus

§ 2. Seosest luminesentsi
intensiivsuse ja voolu
vahel kristallide termoväljakiiritamisel.

Reas töodes 4, 5, 6, 7 käsitletakse seost termoväljakiiritamise luminesentsi ja termovoolu vahel. Anname siin ülevaate nendest töödest ja vaatleme tuletatud valemeid praktilise kasutamise seisukohast.

Protsessidele kristallides lähenetakse, toetudes küllaltki üldisele mudelile.

Olgu kristall homogeenne. Esinegu temas ainult elektroonne juhtivus. Luminesents tekkigu elektronide rekombineerumisest ainult ühte liiki auktsentsitega, ülejäänud haarde- ja rekombinatsioonivoolu spekter on meelevaldne.

Kirjutame üles põhivõrrandi rekombinatsioonilise luminesentsi jaoks, kusjuures peame silmas, et meid huvitab protsesside sõltuvus temperatuurist.

2.1

kus on luminesentsi kvantsaagis, n T ioniseeritud luminesentsisentrile tihedus, N T on

vabade elektronide tihedus, B^{I} on rekombinatsiooni tõenäosus, kui elektron kohtab ioniseeritud tsentrit, on kuumutuskiirus.

Lahendame 2.1 kui diferentsiaalvõrrandi n T suhtes. Siin

2.2

Asetame 2.2 2.1 paremasse poolde ja arvestades, et

2.3

κ on kristalli juhtivus, e on elementaarlaeng ja μ on elektroni liikuvus, saame lõpptulemosena

2.4

Vaatleme lähemalt tingimusi, millest lähtudes saadi valem 2.4 .

Kõigepealt püstitati homogeensuse nõue. Homogeensust võib rikkuda mitte ainult kristalli enda struktuur, vaid ka katsetingimused. Seda peab silmas pidama eksperimendi teostamisel. Ergutatuse, elektrivälja ja temperatuuri gradiendi esinemine kutsub esile difusiooni, mida me oma energetilise mudeliga ei arvesta, ja tuletatud seos lakkab kehtimast. Kuid

isegi siis, kui jätame arvestamata difusiooni, ei kirjelda valem 2.4 homogeensuse tingimuse rikutuse puhul seost mõõdetavate integraalsete suuruste vahel.

Teiseks vaadeldi mudelis ainult elektroonset juhtivust. Muidugi jääks tulemus endiseks ka sel juhul, kui esineks ainult aukjuhtivus. Kristallis kiiritatakse aga välja nii elektron kui ka aukvärvustsentreid 28. Seega saab valemit 2.4 rakendada julgesti ainult elementaarsete maksimumipiirkondade korral väljakiiritamise kõveratel. Kattuvate maksimumipiirkondade korral võib valemit rakendada siis, kui on tehtud kindlaks, et nad on tingitud sama märki laengukandjate poolt.

Kolmanda tingimuse ehaselt peab vaadeldav luminesentskiirgus olema põhjustatud elektronide rekombineerumisest ainult ühte liiki auktsentritega. Eksperimendilt nõuab see luminesentsi intensiivsuse mõõtmist ainult ühes kiirgusribas. Niisugune katsekorralaus on vajalik, kuid sellest võib mitte piisata kooskõla saavutamiseks valemi ja eksperimendi vahel. Nimelt võib luminesents tekkida nii, et elektron või auk rekombineerub mõne tsentriga ja alles siis antakse energia üle luminesentstsentrile 3, 29. Sel juhul ei pea kiirgusriba tekkimine olema põhjustatud rekombineerimisest ainult ühte liiki tsentritel 30.

Valem 2.4 oligi tuletatud eelkõige kui tsoon-

mudeli ja reaalse kristalli vastavuse kriteerium.

Teoreetilise valemi praktilised rakendamisel me ei tea valemis sisalduvate parameetrite arvulisi väärtusi ja nende temperatuurilist sõltuvust.

me ei töötame aeglase kuumutuskiirustega kaugel luminesentsi temperatuurilise kustutamise piirkonnast ja rakendame valemit ainult ühe maksimumpiirkonna ja temale vastava maksimumpiirkonna ulatuses, võime , ja ligikaudu lugeda sõltumatuks temperatuurist 4 .

Arvestades veel, et homogeensete tingimuste korral , kus i on vool kristalli vooluringis, ja et praktiliselt kasutame konstantset kuumutuskiirust, saame töövalemiks 2.4 asemel

2.5

Konstandid C_1 ja C_2 määrame toetudes eksperimentaalsetele kõveratele alljärgnevalt.

Vaatame kõigepealt, kuidas määrata C_2 . Selleks paneme kirja ekstreemumi tingimuse

2.6

kus T_j on eksperimentaalse kõvera J T maksimumile vastav temperatuur. See annab meile

2.7

ja

määrame eksperimentaalse kõvera i T graafilisel diferentseerimisel kohal T

C_1 määramiseks nõuame, et kõvera maksimum langeks kokku maksimumiga eksperimentaalsel kõveral, s.t.

$$C_1 = \text{-----} \quad 2.9$$

C_1 ja C_2 on füüsikalise sisu järgi positiivsed suurused. Kui kirjutame valemi 2.5 ümber järgmiselt

2.10

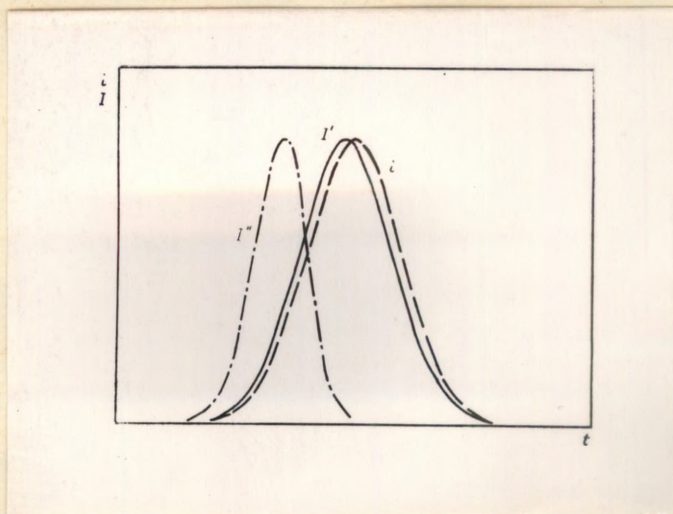
siis näeme, et suhe ---- peab olema monotoonselt kasvav funktsioon /piirjuhul kui i $T = 0$ on ta konstantne/ ja et vool peab saavutama maksimaalvaartuse kõrgemal temperatuuril kui luminesentsi intensiivsus. Seda peame valemi 2.5 põhjal ootama eksperimentaalselt.

Kui voolu kõver on sümmeetriline kellukesetaoline funktsioon, mis on ette antud järgmist tüüpi funktsiooniga

2.11

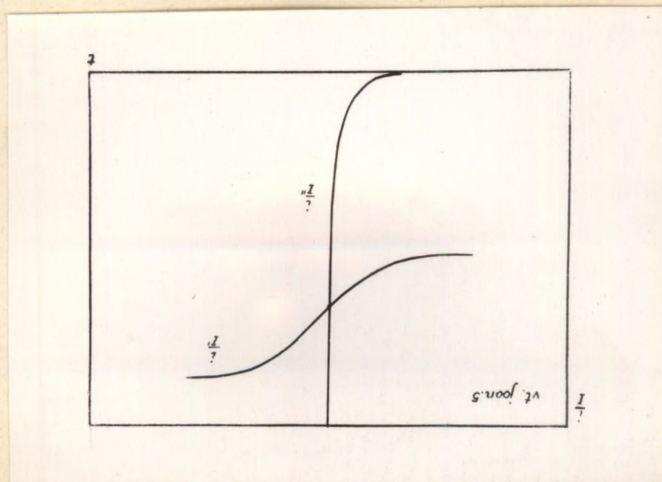
siis saame valemi 2.5 põhjal funktsiooni kuju,

nagu näitab joonis 5.



Joon. 5

Jooniselt näeme, et antud juhul valemi 2.5 põhjal arvutatud kõverad on peaaegu sümmeetrilised, kusjuures mida kaugemal on nende maksimumid esialgse kõvera maksimumist, seda teravamad nad on. Joonis 6 näitab suhte --- käitumist.



Joon. 6

Töös 7 tuletatakse valem, mis lubab ühe lisamõõtmise hinnaga arvesse võtta B T ja T temperatuurilist sõltuvust.

Selleks lisamõõtmiseks on T ja i T registreerimine mingi teise kuumutuskiruse korral.

Lähtevõrrandid näevad nüüd välja järgmiselt:

2.12

Lahendame võrrandid 2.12 $n_{1,2}$ T suhtes

2.13

Arvestame, et

2.14

siis saame 2.12 -st

2.15

2.13 asendamine 2.15 -sse annab meile

2.16

Töös 7 püstitatakse järgmised algtingimused

2.17

Kui kaks viimast algtingimust on liigsed ja

teevad lisaks eksperimendi keerulisemaks. Nimelt nende rahuldamiseks tuleb T_0 -ks valida kristalli ergutamise temperatuur ja kuumutamist alustada kohe pärast ergutamise lõppu.

Sellepärast võtame algtingimuseks ainult esimese võrdluse 2.17 -st. Kui töötame kaugel luminesentsi temperatuurilise kustutamise piirkonnast, siis $\dots = \text{const.}$ Arvestame veel, et kasutame konstantseid kuumutuskiirusi. Siis saame lõppvalemi

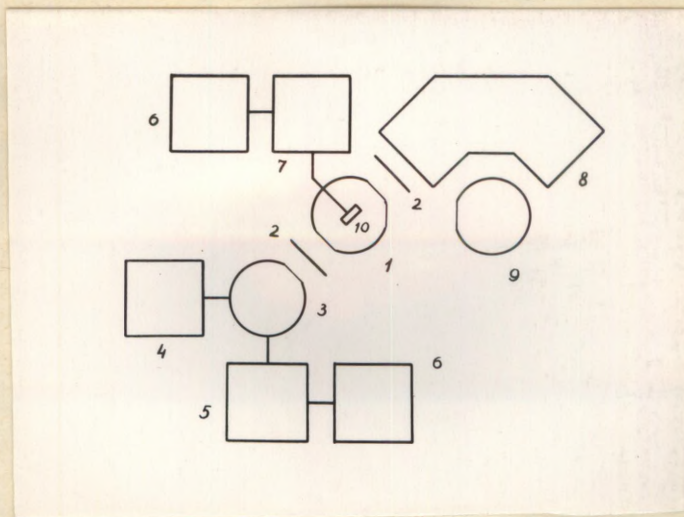
2.18

kusjuures integreerimist tuleb alustada punktist, mis asub kõveratel enne kõiki maksimumipiirkondi. C määramiseks on küllaldane nõuda, et üks punkt mis on arvutatud 2.18 järgi /näiteks termovoolu maksimum/, langeks ühte vastava punktiga eksperimentaalsel kõveral.

Töös 6 saadakse veel üks valem, mis lubab arvesse võtta B T ja I temperatuurilist sõltuvust. Sel puhul kasutatakse lisamõõtmisena väljakiiritamist konstantse ergutuse all. See meetod on vähem perspektiivikas, kas või juba sellepärast, nagu märgitakse 7 -s, et on raske eraldada rekombinatsioonilist luminesentsi kogukiirgustest. Kuid antud meetod andis käesolevas töös tõuke püüda registreerida algvoolu leelishalogeniidkristallides röntgenkiirgusega kiiritamise ajal.

§ 3. Katsekorraldus.

Joonisel 7 on esitatud eksperimentaalse seadme lihtsustatud skeem.



Joon.7

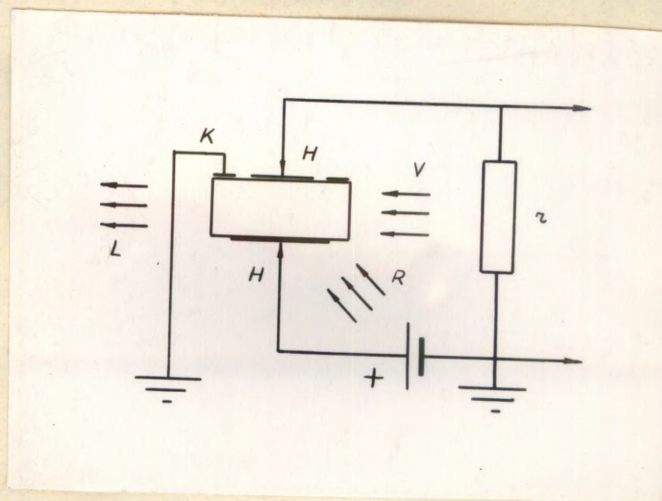
Tähistused on siin järgmised: 1 - vaakumkrüostaat, 2 - valgusfiltrid, 3 - fotoelektronkordistaja -18 , 4 - kordistaja toide, 5 - al. voolu võimendaja, 6 - isekirjutajad H - 373 , 7 - "Kaktus", 8 - monokromaat M - 2 , 9 - röntgentoru CB- 4 MO , 10-kristall.

Kasutatud monokristallid olid kasvatatud Kyropulose meetodil. Katseid teostati järgmiste fosfooridega: NaCl - Ag , KCl-Te, KBr- T , KJ-T . Kristallid lõhestati mõõdeteni umbes 1 x 15 x 15 mm . Al-elektroodid kanti pesle vaakumaurutamise teel.

Elektroodid osutusid püsivaiks, nii et ühe ja sama

kristalliga korduval eksperimenteerimisel ei olnud märgata nende välist muutust, kui välditi niiskuse sadestumist neile, eriti otsekohe pärast elektroodide pealeaurustamist.

Kristall ühendati vooluringi joonise 8 kohaselt.



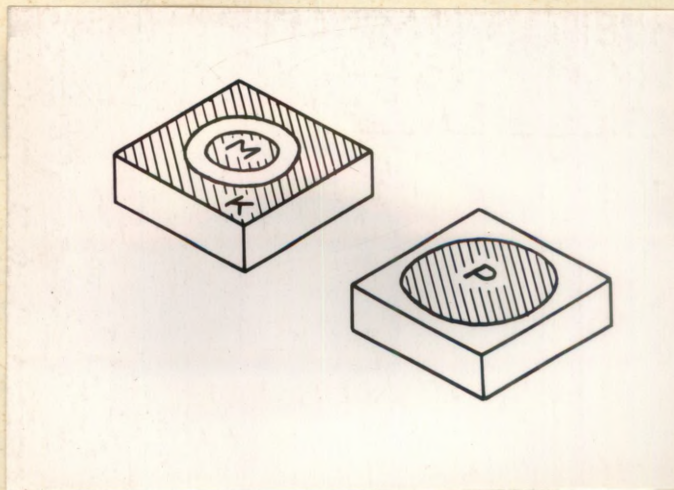
Joon.8

Joonisel kasutatakse järgmisi tähistusi:

R - röntgenkiirgus, V - stimuleeriv valgus, L - luminesentskiirgus, H - kristallihoidjad, K - kaitseelektrood, r - koormustakistus.

Kaitseelektroodi kasutamine kõrvaldas kristalli pindjuhtivuse häiriva mõju.

Elektroodide paigutust kristalli tahkudel näitab joonis 9 / M - mõõteelektrood, K - kaitseelektrood, P - pingestamiselektrood/ .



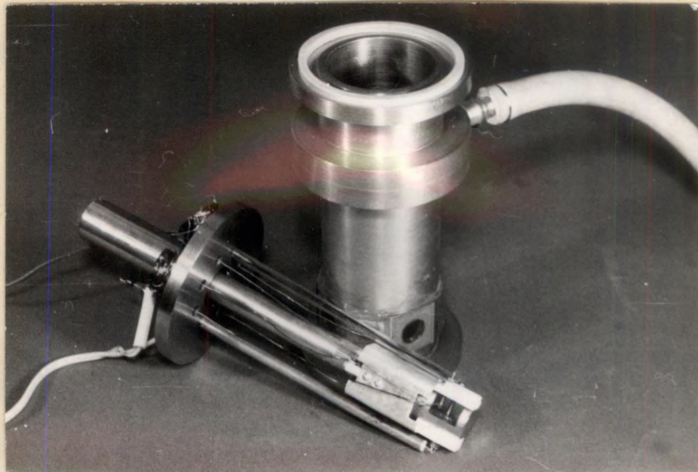
Joon. 9

Mõõteriistana kasutati mikroröntgenomeetrit "Kaktus", mis kujutab endast lampelektromeetrit maksimaalse tundlikkusega $3 \cdot 10^{-4}$ A jaotise kohta. Kristallivoolude mõõtmisel töötati peaaegu alati maksimaalse tundlikkuse piirkonnas. Kristalli koormustakistuseks oli "Kaktuse" elektronmeeterlambi võretakisti / maksimaalse tundlikkuse puhul 10^{11} / .Kristalli pingestati tavaliselt "Kaktuse" stabiliseeritud alaldajast pingega 220 V.

"Kaktuse" ja - 18 võimendaja näidud kirjutatiüles isekirjutajate H - 373 abil, mis osutusid ainsatena töötavateks kasutatud röntgenseadme töötamise ajal. Elektrilise võimendusega isekirjutavad potentsio- meetrid kaotasid siis tundlikkuse arvatavasti magnet- väljade mõju tõttu.

Vaakummkrüostaadi ehitust näitab joonis 10.

Krüostaat oli konstrueeritud spetsiaalsete väikeste
voolude mõõtmiseks kristallides võimalusega registreerida



Joon. 10

paralleelselt ka luminestsentsi.

Krüostaat koosneb metallkestast ja - kaanest.
Viimane moodustab terviku anumaga vedela õhu jaoks ja
kristalli kinnitusseadeldisega.

Elektriline isolatsioon on teostatud fluorooplast-
4 ja klaasi abil.

Mõõteelektroodiga ühendatud juhtme hea isolatsi-
ooniga vaakumkindel läbiviik krüostaadi kaanest on
teostatud hermeetilise paberkondensaatori /tüüp K -M /
klaasisolaatoriga, millel oli ainsana tunduvalt suurem
 10^{13} takistus kui teistel vaadeldud eksemplaridel.

Kristallihoidjad, mis kujutavad endast vedru-
keste abil vastu kristalli surutavaid metallvardaid,

on isoleeritud fluoroplast - 4 abil. See on antud kohas asendamatult materjal, kuna ta ruumeritakistus on umbes 10^{17} cm, ta ei keela praktiliselt vett ja talub temperatuuri vahemikus $- 200^{\circ} - + 300^{\circ} C$. Viimati mainitud asjaolu määrabki meie krüostaadi võimaliku temperatuurilise kasutuspiirkonna.

Et ära hoida niiskuse sadestumist kõrgeoomilisele klaasisolaatorile, eriti krüostaadi jahutamisel, hoitakse isolaatori temperatuuri pidevalt toatemperatuurist veidi kõrgemal väikese elektriabjuga abil.

Krüostaadi kaanel on lisaks kõrgeoomilisele veel 7 klaasisolaatorit, millest on läbi viidud termopaaride juhtmed ning juhtmed kristalli kuumutusahju toitmiseks ja kristalli pingestamiseks.

Kuumutusahju / takistus umbes 20 / toidetakse vahelduvpingega. Maksimaalne lubatud voolutugevus on 1,2 A. Sellega saavutatakse kuumutuskiirus umbes 0,2 kraadi sek. Kuumutusahi on elektrostaatiliselt ekraniseeritud. Selle ekraani ärajätmine segab väga mõõtmisi.

Elektrostaatiliselt on ekraniseeritud ka mõõteelektroodi elektromeetriga ühendav juhe kogu ulatuses. Süsteem on hoolikalt maandatud.

Krüostaadi kaane ja kesta vaheline vaakuumisolatsioon on teostatud kummitihendi abil. Vaakuum on

vajalik soojusjuhtivuse vähendamiseks, kristallile niiskuse sadestamise vältimiseks temperatuuri langetamisel ja õhu ioonse juhtivuse mõju vältimiseks mõõtmistele kristalli kiiritamise ajal röntgenkiirtega.

Ekspérimentaalselt tehti kindlaks, et röntgenkiirituse all pole õhu juhtivuse mõju segav rõhu puhul krüostaadis alla 10^{-2} mm Hg . Vaakuum ei tohi olla halvem ka sel juhul kui tahetakse kristallile rakendada kõrgemaid pingeid kui 220 v, eriti röntgenkiiritamise ajal, tekkiva gaaslahenduse ja labilöögi tõttu. Röntgenkiiritamise ajal on segavaks asjaoluks ka väline fotoefekt elektroodidest kristalli.

Selle võimalikkust kinnitas järgmine katse.

Krüostaadi kristallihoidjad eraldati teineteisest 1 mm kaugusele, ilma et nende vahele oleks paigutatud kristalli. Kristallihoidjatele rakendati tavalise lülituse kohaselt /jbon.8/ pinge. Kui negatiivne kristallihoidja oli Pb-st, oli röntgenkiirguse ajal registreeritav vool suurusjärgu võrra suurem kui sel juhul, kui kristallihoidja oli Al-st. Mõõtmisi teostati vaakuumis ja röntgenkiirguse kõrvaldamisel voolu ei registreeritud.

Röntgenkiirguse all leelishalogeniidkristallides tekkiva voolu mõõtmisel täheldati tüüpilist polarisatsiooniga seotud voolu käitumist / joonis 3/ . Siin on polarisatsiooni tekke põhjustest võimalikud nii

elektroodide ja kristalli vahelised mitteoomilised kontaktid kui ka kristalli ebaühtlase kiiritamine. Kasutatud röntgenkiirgust /molübdeenanoodiga toru, tavaliselt toitepingega 30 kV ja anoodvooluga 20 mA / neelas tugevasti isegi NaCl - kõige "kergem" kasutatud kristallidest. Seda oli näha värvumise intensiivsuse suurest gradiendist kristallis.

Näib, et röntgenkiirguse poolt leelishalogeniidkristallides tekitatud algvoolu pidevaks registreerimiseks, mis on vajalik kui tahetakse vaadelda voolu paralleelselt luminesentsi süttimisele või termoväljakiiritamisele kiirguse all 6μ , on järgmine võimalus.

Kristallile rakendatakse pinge impulsina 1 -2 sek. Selle aja jooksul ei jõua polarisatsioon märgatavat mõju avaldada. Seejärel kristall lülitatakse. Neid operatsioone pidevalt korrates / selleks võib konstrueerida lihtsa elektronseadme /, saame algvoolu ajalise sõltuvuse punktide kaupa. Mõju ärahoidmiseks, mida avaldab väline fotoefekt elektroodidest, võib kristalli kiiritada nii, et röntgenkiirgus ei satuks elektroodidele. Kuid võib kiiritada ka läbi positiivse elektroodi nagu meie katsetes, kusjuures siis peab hoolitsema selle eest, et kiirgus ei satuks negatiivsele mõtteelektroodile. Niisugune tingimus on täidetud, kui valime

kristalli küllalt paksu, nii et peaaegu kogu röntgenkiirgus neeldub temas. Et see on võimalik, näitas järgmine katse.

• Krüostaadi pingestatud kristallihoidjate vanele ei paigutatud jälle kristalli. Seevastu kristall / 1 mm paksune KBr -Ti / paigutati kristallihoidjate ette. Sel juhul röntgenkiiritamise ajal voolu kristallihoidjate vahel ei täheldatud vastupidiselt ülal kirjeldatud katsele.

Kuid kogu idee teostamine antud katseaparatuuriga osutus võimatuks mõõtmissüsteemi sisendi liiga suure ajakonstandi tõttu / kümned sekundid/. Laadimisvoolude kestuse lühendamiseks tuleks hoolitseda minimaalse sisendmahtuvuse eest sisendi geomeetria muutmise ja 100 %-lise negatiivse tagasiside kasutamisega lamp-elektromeetris.

Antud aparatuur on kasutatav kõigiks kuueks sissejuhatuses mainitud mõõtmiseks.

Tenti kindlaks, et registreerida fotovoolu koos optilise sähvatusega on võimalik KCl-Ti /0,1 mool %/ ja NaCl- Ag /0,5 mool %/ puhul, kusjuures KCl puhul piisas valgustamisest F-ribas läbi monokromaatori

M- 2, samal ajal kui NaCl tuli stimuleerida 500 W projektsioonlambiga.

Põhiliselt teostati aga termovoolu ja termo-

väljakiiritamisluminestsentsi intensiivsuse registreerimist.

Kristalli kuumutuskiirust hoiti konstantsena ahju voolu reguleerimise teel autotransformaatoriga. Temperatuurimärgid kanti isekirjutajate lintidele sälkudena. Selleks kasutati lüliti, mis lühistas samaaegselt mõlema isekirjutaja sisendid. Temperatuuri mõõdeti vask-konstantaantermopaariga, mille gradueerimiseks madalatel temperatuuridel kasutati vedeliktermomeetrit. Tavaliselt registreeriti massiivse vaskploki temperatuuri, millele toetus kristall ühe tahuga. Kristalli vastastahu temperatuuri võis mõõta teise termopaariga. See mõõtmine näitas aeglase kuumutuskiiruse vajalikkust temperatuuri gradiendi vähendamiseks kristallis.

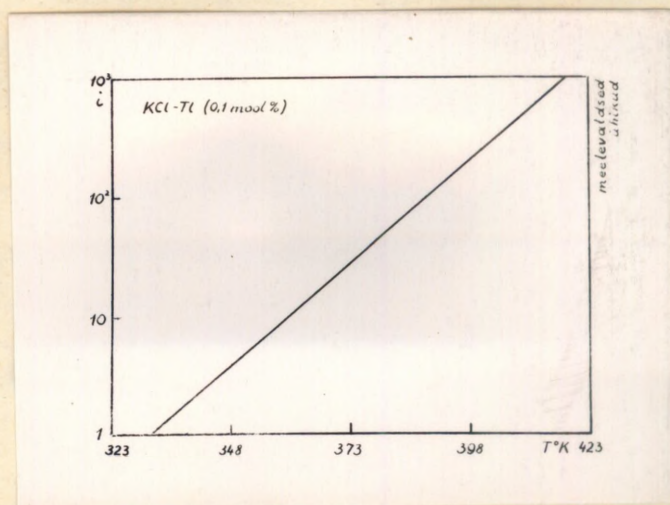
Kristalle ergutati röntgenkiirtega madalal temperatuuril /umbes -130°C /. Kristalli kaugus röntgentorust oli umbes 10 cm. Ühtlasema ergutatuse saamiseks kasutati lisaks krüostaadi Al 0,07 mm aknakesele veel Cn 0,02 mm filtrit.

Mõõtmistulemusi käsitleb järgmine paragrahv.

§ 4. Mõõtmistulemused ja nende
kõrvutamine teoreetiliste
seostega.

Termovoolu ja termoluminestsentsi paralleelne registreerimine leelishalogeniidfosfoorides näitas, et uuritud juhtudel esines voolu ja luminestsentsi intensiivsuse maksimumipiirkondade üksühene vastavus. Alati oli voolu maksimum võrreldes luminestsentsi intensiivsuse maksimumiga nihutatud kõrgemate temperatuuride poole.

Alates teatud temperatuurist muutus domineerivaks ioonne juhtivus, mis suurenes temperatuuri tõusuga eksponentsiaalselt / joonis 11/.

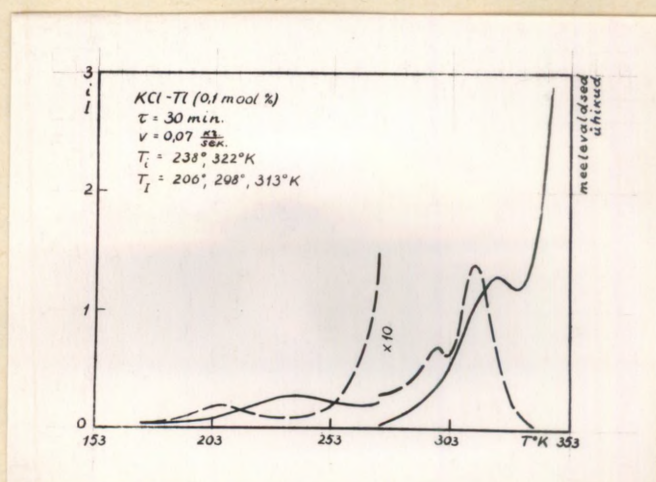


Joon. 11

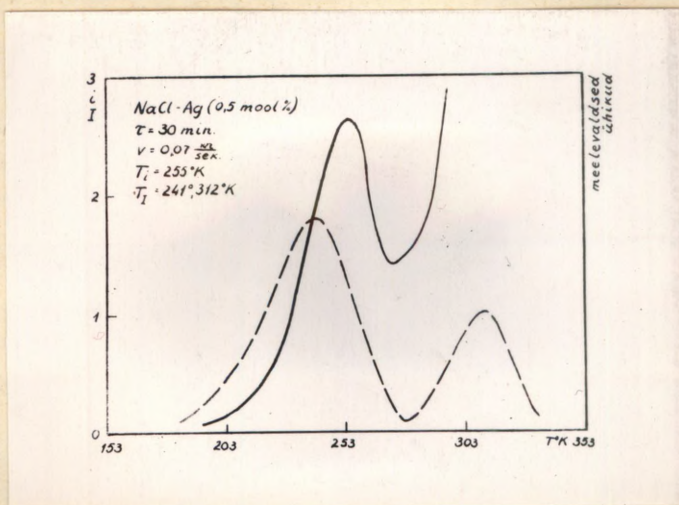
Järgitava ioonse juhtivuse alguse temperatuur kasvas uuritud kristallidel vastavalt reale NaCl, KCl, KBr, KJ ja langes vahemikku mõned kümned kraadid ühele ja teisele poole temperatuurist.

Mõningaid mõotmistulemusi kujutavad joonised 12- 20. Nendel on kasutatud järgmisi tähistusi: - röntgen-ergutuse aeg § 3- s kirjeldatud tingimustes, V -kuumutuse kiirus, T_i - voolu maksimumile vastav temperatuur, T - luminesentsi maksimumile vastav temperatuur. Voolu i T kujutab pidev joon, luminesentsi intensiivsust T kriipsjoon.

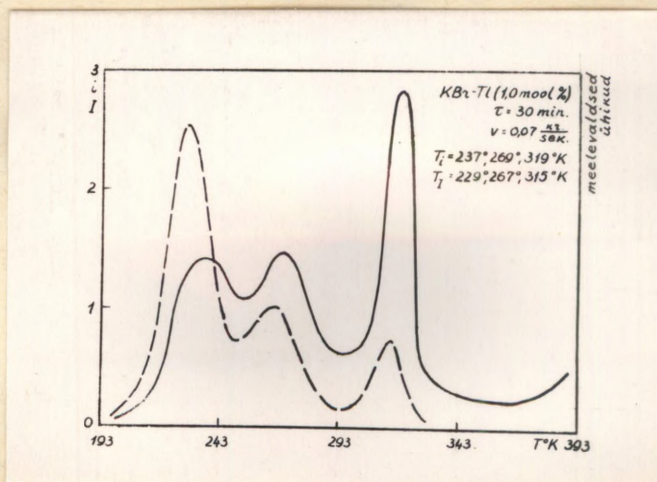
Joonistel 12 ja 13 näeme ioonse ja elektroonse voolu kattumist.



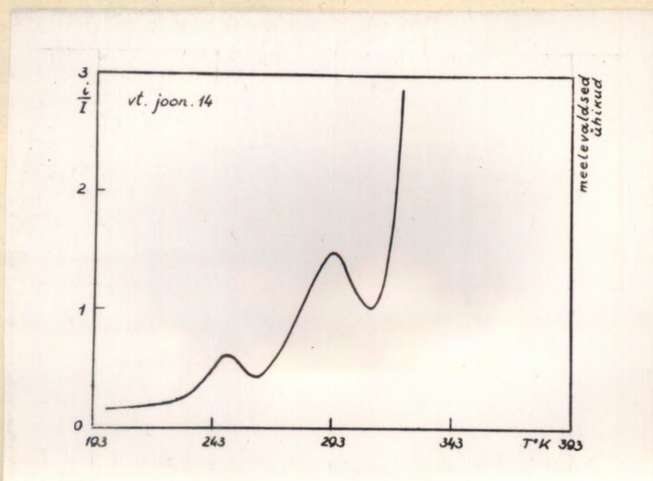
Joon. 12



Joon. 13



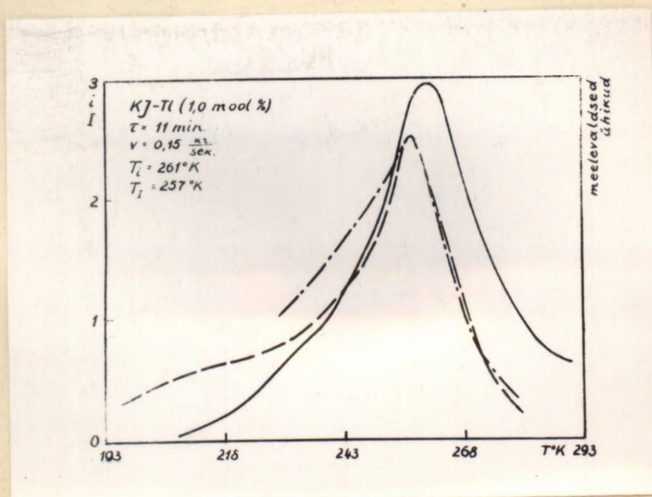
Joon. 14



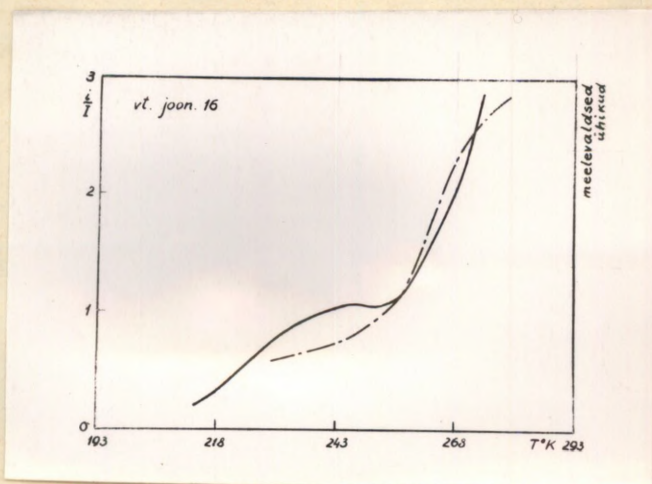
Joon. 15

Joonised 14 ja 15 kuuluvad kokku, viimane neist näitab suhte ---- käitumist.

Tuletame meelde, et valemi 2.5 rahuldamiseks pidi see suhe monotoonselt kasvama. Tuleb aga märkida, et mitte ühtegi teostatud mõõtmise puhul ei olnud see nii. Valemi 2.5 annab seega tulemused, mis lähevad lahku eksperimendi andmetest. Näitena esitame arvutus- tulemused KJ-Tl puhul, mida kujutavad joonised 16 ja 17. Arvutatud kõver on kujutatud seal kriips-punktjoonega.



Joon. 16



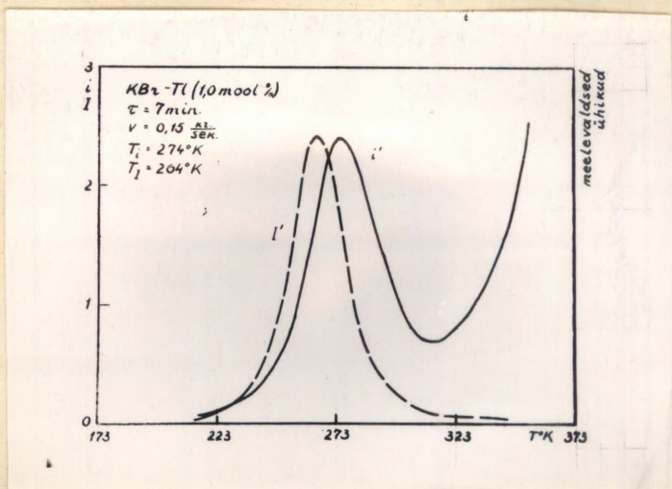
Joon. 17

Jäädes toetuma valitud tsoonmudelile, võime teooria ja eksperimendi vahelise erinevuse seletamiseks oletada valemis 2.4 sisalduvate parameetrite olulist sõltuvust temperatuurist. Valemiga 2.16 võeti see sõltuvus arvesse. Sellespärast on meie mudeli täielikuks ammendamiseks vaja rakendada just valemit 2.16. Nii tehti ühel korral ka antud töös.

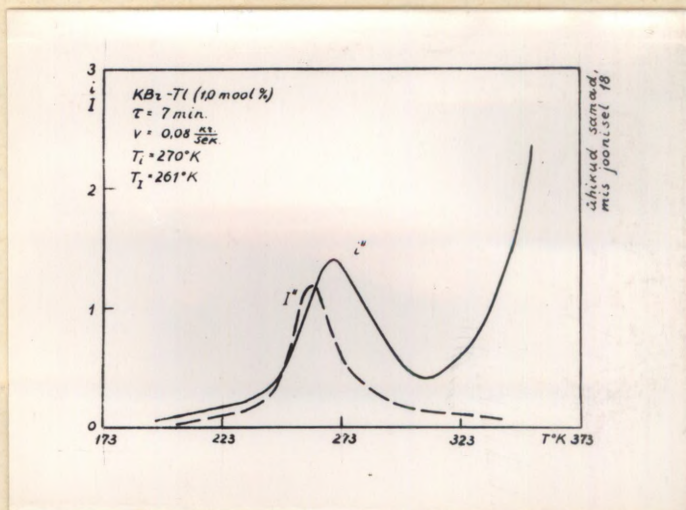
Enne kui asume kirjeldama seda katset, peatume veel veidi jooniste 16 ja 17 juures. Sealt näeme, et nii voolu kui ka luminesentsi intensiivsuse maksimumpiirkondade algusosades võib märgata väikest ebaühtlust, mis viitab teise maksimumpiirkonna olemasolule. Sealsamas lähedal käitub suhe ---- mitte-monotoonselt ja teoreetiline kõver eemaldub eksperimentaalsest.

Kui vaatleme jooniseid 14 ja 15, siis näeme, et suhe
----- kaotab monotoonsuse samuti temperatuuridel,
kus üks maksimumipiirkond läheb üle teiseks. Teos-
tatud katsete vähesuse tõttu ei saa kindlalt väita,
et see on seaduspärasus, kuid tulevikus tasub sellele
võib-olla tihkem tähelepanu pöörata.

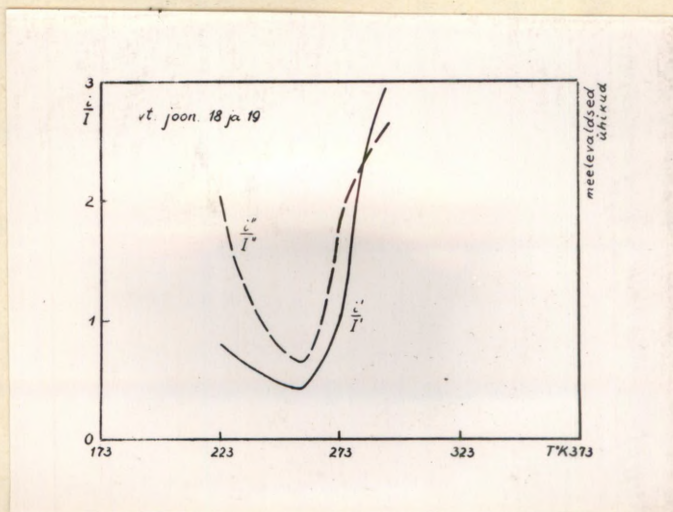
Vaatleme nüüd, kuidas toimus valemi /2.16 /
võrdlemine eksperimentidega. Selleks oli vaja läbi viia
kristalli termoväljakiiritamine kahe erineva kuumutus-
kiirusega. Seega koosnes katse kahest osast, kusjuures
kõik muud tingimused peale kuumutuskiirise pidid jää-
ma muutumatuteks. Seda püüti saavutada järgmiste vaheti-
ga: kristalli asend jäi kogu katse jooksul muutmatuks,
kristalli ergutusaja lühendati, kusjuures ta oli
mõlemal korral sama pikk, ergutati ühel ja samal tempe-
raatuuril ning kuumutamist alustati pärast seda, kui
kristalli järelhelendus langes alla registreerimisläve
ja sealjuures pärast ühepikkuse ajavahemiku möödumist
alates ergutamise lõpetamisest, kahe katse vahel teostati
kristalli lisaväljakiiritamine valgustamise teel valge
valgusega. Mõõtmistulemused näitavad joonised 18, 19
ja 20.



Joon. 18.



Joon. 19



Joon. 20

Suhete ----- käitumisest näeme, et valem 2.5 ei anna siin ilmselt mõistlikku tulemust. Kuid osutus, et ka valem 2.18 andis ootamatult halva tulemuse : nimelt oli arvutatud suhe ---- katkev funktsioon /murru nimetaja nulliks muutumise tõttu valemis 2.18 / . Valemite 2.18 lähemalt vaadeldes, saab öelda, et teoreetilise suhte ---- niisugune käitumine poleks võimalik, kui eksperimentaalsed suhted ----- erineksid vähem teineteisest / joonis 20/. Asja selgitamiseks on vaja korraldada uusi katseid. Praegu saame aga jällegi ainult juhtida tähelepanu võimalikule seaduspärasusele suhete ----- käitumises.

Lõpuks puudutame veel segavaid asjaolusid mõõtmistel. Kristallis esines nii temperatuuri kui ka ergutatuse gradient. On võimalik, et esines ka

väljatugevuse gradient ja võib-olla muutuv ruumlaeng. Kuna puudus sobivate valgusfiltrite komplekt, millega oleks saanud igakordselt eraldada ainult ühe kiirgusriba maksimumpiirkonnana, töötati tihti kasutades kiirgusriba "saba". Nimelt registreeriti kõikidel juhtudel luminesentsi läbi filtri - 2. Kuid kiirgusriba muutused temperatuuri muutustel avalduvad eriti oluliselt nende "sabades". Viimasele asjaolule juhtis tähelepanu K.Rebane.

K o k k u v ö t e .

Voolu mõõtmine leelishalogeniidkristallides on eksperimentaalse tehnika poolest tunduvalt komplitseeritum kui luminesentsi intensiivsuse mõõtmine. Küllap sellepärast on nende kristallide puhul voolu mõõtmisega seotud tööde arv tunduvalt väiksem luminesentsi intensiivsuse mõõtmisel põhinevate tööde arvust. Ometi võib kristalli juhtivus anda meile, ja mitte vähemal määral kui luminesents, informatsiooni kristallis toimuvatest protsessidest, tehes seda samal ajal veidi teisest aspektist kui luminesents. Eriti viljakas peaks olema luminesents- ja voolumeetodite kompleksne rakendamine, mida võiks teha iga kord, kui see vähegi on võimalik.

Käesoleva töö raames püüti konstrueerida eksperimentaalne seade, mis annaks võimaluse uurida paralleelsete röntgenkiirguse poolt tekitatud juhtivust ja luminesentsi leelishalogeniidkristallides. Vaakumkrüostaadi lõppvariandi juures mida kirjeldatakse § 3-s, õnnestus üle saada reast mõõtmisi seada võivatest asjaoludest. Kogu aparatuur võimaldab teostada termo- või fotostimuleeritud voolude mõõtmisi pärast röntgenergutuse lõpetamist.

Töös kavandatakse ka võimalik metoodika ruumlaengu efektidest varjutamata voolude pidevaks registreerimiseks

leelishalogeniidkristallides röntgenergutuse ajal.

Mõningad mõõtmised, mis viidi läbi, olid seotud töödes 4, 5, 6, 7 tuletatud valemite ja eksperimendi võrdlemisega. Mõõtmised andsid kõigil juhtudel tulemusi, mis erinesid teoreetilistest vahekordadest. Samal ajal olid mõõtmised oma põhijoontes reprodutseeritavad, nagu kinnitas mõnede katsete kordamine. Samuti kinnitas paralleelism voolu ja luminesentsi intensiivsuse vahel termostimuleeritud luminesentsi rekombinatsioonilist iseloomu. Lahkumine teooria ja eksperimendi vahel viitab sellele, et kas eksperimendi tingimustest, protsesside enda loomusest või mõlema teguri koosmõjustusest tingituna on lihtsustatud energetilise mudeli rakendamine antud juhul mittepiisav.

Lõpuks avaldab autor tänu A.Purgale ja K.Rebasele esitatud teema, kasulike nõuannete ja oma veel trükkis olevate töödega tutvustamise eest, samuti T. Soovikule pideva tähelepanu eest töö juhendamisel.

K i r j a n d u s .

1. X.Ф. Квэмбре. Ч. Б. Лушик, Труды ИФА АН ЭССР, II, 150, 1960.
2. Ч. Б. Лушик. Труды ИФА АН ЭССР, 3, 1955.
3. М.Л. Кац. Люминесценция и электронно-дырочные процессы в фотохимически скрапленных кристаллах щелочно-галондных соединений. Из-во Саратовского ун-та, 1960.
4. К.К. Ребане, О.И. Силц. Труды ИФА АН ЭССР, II, 130, 1960.
5. К.К. Ребане. ФГТ, 2, 273, 1960.
6. А.П. Пурга. Труды ИФА АН ЭССР, 14, trükis.
7. А.П. Пурга, К.К. Ребане. Труды ИФА АН ЭССР 15, trükis.
8. M. Ben Sira, B. Pratt, H. Harnik, A. Many. Phys. Rev., 115, 554, 1959.
9. A. Hippel, E. Gross, J. Jelatis, M. Geller. Phys. Rev., 91, 568, 1953.
10. Н. Мотт, Р. Герни. Электронные процессы в ионных кристаллах. III, 1950.
11. A. Rose. Phys. Rev., 97, 1538, 1955.
12. C. Rhys-Roberts, R. Tredgold. Proc. Phy. Soc. 76, 497, 1960.
13. R. Pohl. Proc. Phys. Soc. 49, 3, 1937.
14. Р. Поль. Полупроводниковые материалы (сб. статей), III, 1954.
15. П.С. Тартаковский. Внутренний фотоэффект в диэлектриках. ПИГЭЛ, 1940.

16. D. Dutton, R. Maurer. Phys. Rev., 90, 126, 1953.
17. D. Dutton, A. Heller, R. Maurer. Phys. Rev., 84, 363, 1951.
18. K. Teegarden, R. Maurer. Z. f. Phys., 138, 284, 1954.
19. C. Delbecq, P. Pringsheim, P. Yuster.
Zs. f. Phys., 138, 266, 1954.
20. G. Chiarotti, N. Inchauspe. Phys. Rev., 109, 345, 1958.
21. Я.А. Валбис, И.К. Витол, В.Э. Зирап. Изв. АН СССР,
сер. физ. 25, 377, 1961.
22. H. Harten. Zs. f. Phys., 126, 619, 1949.
23. J. Oberly, E. Burstein. Phys. Rev., 79, 217, 1950.
24. J. Oberly. Phys. Rev., 83, 228, 1951.
25. J. Oberly. Phys. Rev., 84, 1257, 1951.
26. G. Kuwabara, A. Misu, T. Watanabe, Y. Nishiyama.
Journ. Phys. Soc. Jap., 14, 1621, 1959.
27. J. Taylor, P. Hartman, Phys. Rev., 113, 1421, 1959.
28. П.А. Хелленурме. Труды ИФА АН ЭССР, 7, 340, 1958.
29. Ч.Б. Луцк, В.И. Волин. Труды ИФА АН ЭССР, 7,
311, 1958.
30. К.К. Ребане. Труды ИФА АН ЭССР, 8, 157, 1958.

Резюме

Основной целью настоящей работы было усвоение методики измерения тока в щелочно-галогидных кристаллах. Окончательный вариант экспериментальной установки, который описывается в § - 3, позволяет измерять термо- и фотостимулированные токи в кристаллах после возбуждения их рентгеновыми лучами. Там же предлагается вариант возможной методики для измерения незаслоненных эффектами объемного заряда токов в кристаллах во время возбуждения рентгеновыми лучами.

Кроме того в данной работе производится сопоставление данных измерений с теоретическими формулами о связи термолуминесценции с термостимулированным током (2.5) и (2.18), которые выведены в работах К.К. Ребане и А.П. Пурга 4, 5, 6, 7. . Согласия между теоретическими соотношениями и результатами измерения не получено.

S i s u k o r d.

lk.

Sissejuhatus.

§ 1. Voolude mõõtmisest leelishalogeniid- kristallides	5
§ 2. Seosest luminesentsi intensiivsuse ja voolu vahel kristallide termo- väljakiiritumisel	17
§ 3. Katsekorraldus	25
§ 4. Mõõtmistulemused ja nende kõrvutamine teoreetiliste seostega	34
Kokkuvõte	43
Kirjandus	45
Venekeelne resüme	47