

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Matemaatika-loodusteaduskond

Füüsikainstituut

HALLI EFEKTI UURIMINE POOLJUHTIDES

Bakalaureusetöö

Kätlin Tiigi

Juhendaja: Aleksei Gavrilov, rakendusfüüsika õppetool,
dotsent

Tehniline füüsika

2014

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidanud.

Töö autor Kätlin Tiigi

2. juuni 2014

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: dotsent Aleksei Gavrilov

„.....“ juuni 2014

Lubatud kaitsmisele

„.....“ juuni 2014

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Sisukord

SISSEJUHATUS	3
1. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED	5
1.1 Halli efekti teooria.....	5
1.2 Halli efekti mõõtmine.....	9
2. KATSESEADE.....	12
3. KATSETE TULEMUSED	19
3.1 Halli pinge ja voolutugevus läbi katsekeha	19
3.2 Halli pinge ja magnetiline induksioon	21
3.3 Halli pinge ja katsekeha paksus.....	22
3.4 Halli pinge ja põhiliste laengukandjate kontsentratsioon.....	23
KOKKUVÕTE.....	30
SUMMARY	31
KASUTATUD KIRJANDUS	33
LISAD	34
Lisa 1 Katsekehade andmed.....	34
Lisa 2 Mõõteseadmete andmed.....	35

SISSEJUHATUS

Halli efekt kuulub niinimetatud galvanomagneetiliste ehk selliste nähtuse hulka, mis esinevad voolujuhis, kui talle on samaaegselt rakendatud nii elektriväli kui ka magnetväli. Erinevaid galvanomagneetilisi nähtusi on palju, kuid Halli efekti võib pidada kõige tähtsamaks [1].

Halli efektiks nimetatakse potentsiaalide vahe tekkimist juhi paralleelsete tahkude vahel, kui juhi otstest lastakse läbi alalisvool ning juht asetatakse alalisvoolu suunaga ristuvasse magnetvälja. Potentsiaalide vahe tekib magnetväljaga paralleelsete tahkude vahel ja seda nimetatakse Halli pingeks. Selle nähtuse avastas 1879. aastal Edwin Herbert Hall [2].

Halli efekt esineb nii pooljuhtides kui ka metallides, kusjuures efekt avastati esimesena metallides – väga õhukestes kuldlehekestes. Pooljuhtides on Halli efekt mitu suurusjärku suurem kui metallides, sest efekt on pöördvõrdeline laengukandjate kontsentratsiooniga ja metallides on laengukandjate kontsentratsioon väga suur, aga pooljuhtides väike. Halli efektil põhinevaid mõõtmisi alustati ja hakati laialdaselt kasutama umbes 50-60 aastat peale efekti avastamist, sest siis hakkasid pooljuhtmaterjalid domineerima erinevates seadmetes ja elektroonikas [3]. Eriti suure rolli omandasid Halli efektil põhinevad mõõtmised aastail 1950-1960, kui hakati valmistama puhtaid pooljuhte. Tänapäeval kasutatakse pooljuhtmaterjale laialdaselt elektroonikas, autotööstuses, energeetikas, laserites ja mujal ning Halli efektil on suur roll pooljuhtmaterjalide põhiparameetrite mõõtmisel ja niinimetatud Halli andurite kasutamisel.

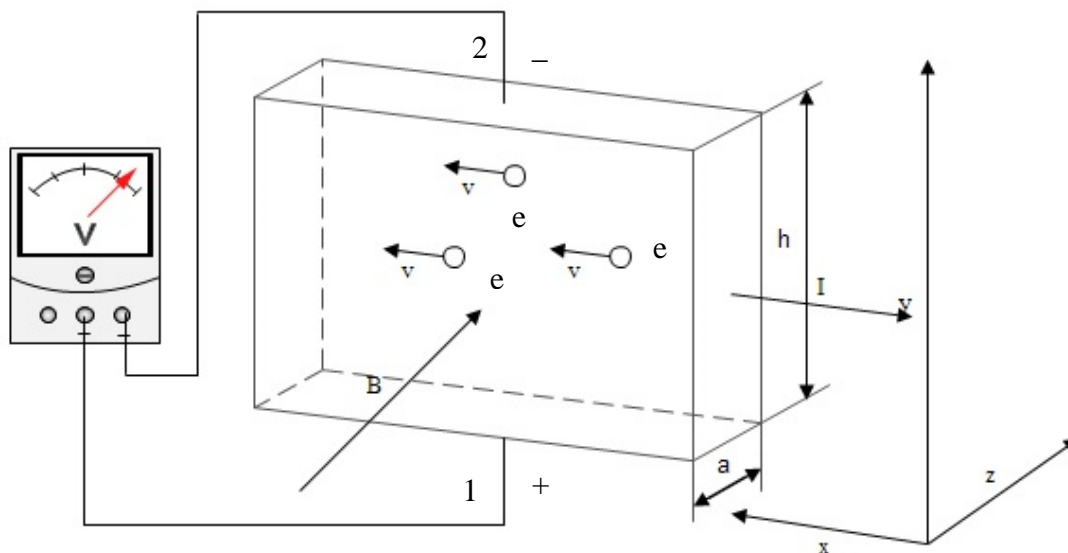
Antud töö eesmärgiks on tutvuda lihtsamal kujul Halli efekti teoriaga. Teooria annab Halli efekti arvutamiseks ette valemi ja selle töö eesmärgiks on uurida Halli pinget ja kontrollida eksperimentaalselt, kas see pinge on võrdeline voolutugevusega läbi katsekeha ja magnetvälja induksiooniga ning pöördvõrdeline katsekeha paksusega. Teiseks eesmärgiks on kontrollida, kas erinevate pooljuhtide korral on Halli pinge ja põhiliste laengukandjate kontsentratsiooni vahel pöördvõrdeline seos.

Antud töö kirjutamisel on jälgitud, et tööd oleks sobilik kasutada detailse juhendina tehnilise füüsika bakalaureuseõppe tudengitele praktikumi sooritamiseks õppeaines YFR4711 Eripraktikum I.

1. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED

1.1 Halli efekti teooria

Vaatleme homogeenet risttahukakujulist n-tüüpi pooljuhist valmistatud plaati, mille otsad on kaetud oomiliste kontaktidega (joonis 1). Rakendame plaadi otstele x-teljega vastassuunalise alalisvoolu tugevusega I . Üldfüüsikast on teada, et vool kujutab endast laengukandjate suunatud liikumist [4] ning n-tüüpi pooljuhis on põhilisteks laengukandjateks negatiivse laenguga elektronid, mis hakkavad alalisvoolu toimel liikuma piki x-telge voolu suunaga vastassuunas.



Joonis 1. Halli efekt pooljuhis

Kuna elektron liigub antul juhul tahkes kehas, siis kasutame edaspidi vaba elektroni massi asemel efektiivset massi m^* [4, 5]. Elektron efektiivse massiga m^* ja elektrilaenguga e liigub pooljuhis kiirendusega a , mis avaldub Newtoni teise seaduse kohaselt järgmiselt:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m^*},$$

kus elektronile mõjuv jõud $\vec{F} = e\vec{E}$ ning valem omandab kuju:

$$\vec{a} = \frac{e\vec{E}}{m^*}$$

Pooljuhis on elektroni vaba tee pikkus ja aeg τ lühikesed ning seetõttu ei omanda elektron põrgete vahel suurt kiirust. Antud juhul on mõistlik kiirenduse asemel vaadelda elektronide keskmist liikumiskiirust ehk triivkiirust [3], mis avaldub järgmiselt:

$$\vec{v} = \frac{\vec{a}\tau}{2} = \frac{e\vec{E}\tau}{2m^*} = \mu\vec{E},$$

kus a on elektroni kiirendus pooljuhis, τ vaba tee läbimiseks kuluv aeg, e elementaarlaeng, \vec{E} elektrivälja tugevus pooljuhis, m^* elektroni efektiivne mass ja suurus μ nimetatakse elektroni liikuvuseks. Triivkiirus määrab ära ka voolutiheduse vektori \vec{j} suuna [4]:

$$\vec{j} = en\vec{v} \tag{1}$$

Kui kanda plaadi alumisele ja ülemisele tahule kontaktid 1 ja 2 nii, et nad oleksid kohakuti, siis asetsevad nad ühel ekvipotentsiaalpinnaal ja potentsiaalide vahet kontaktide vahel ei ole ning pinget ei registreerita. Kui tekitada z -telje suunaline magnetväli, siis mõjub liikuvale laengule Lorentzi jõud:

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}),$$

kus e on laengukandjate ehk elektronide laeng ja B magnetilise induktsiooni väärtus. Pooljuhis olevad elektronid liiguvad risti magnetvälja \vec{B} suunaga ja vastavalt vektorkorrutise reeglile mõjub elektronidele Lorentzi jõud vertikaalselt suunaga alt üles. Lorentzi jõu mõjul kaob kontaktide 1 ja 2 ekvipotentsiaalsus, sest Lorentzi jõu mõjul suureneb elektronide kontsentratsioon kontakti 2 ümbruses laadudes negatiivselt ning kontakti 1 ümbrus laadub elektronide puudujäägi tõttu positiivselt. Nüüd tekib y -telje suunas elektrivälja ja selle mõjul tekib vastupidine elektronide voog ülevalt alla. Mõningi potentsiaalide vahe ehk Halli pinge korral elektronide voog alt ülesse Lorentzi jõu mõjul on võrdne elektronide vooga ülevalt alla elektrivälja mõjul ja seda võib nimetada tasakaalu olekuks. Tasakaalu olek tekib, kui Lorentzi jõu F_L ja elektrilise jõu F_E absoluutsed väärtused on võrdsed:

$$F_L = F_E$$

Elektrilise jõu suurus y -telje suunas avaldub järgmiselt:

$$F_E = eE_y, \quad (2)$$

kus E_y on elektrivälja tugevus y -telje suunas. Viimase võrrandi (2) võime kirjutada järgmiselt:

$$evB = e \frac{U_H}{h} \quad (3)$$

Valemi vasakul poolel oleva Lorentzi jõu väärtus on $evB \sin \alpha$, kus α on vektorite \vec{v} ja \vec{B} vaheline nurk, mis antud juhul on 90° , U_H on Halli pinge ja h katsekeha kõrgus. Viimast valemit (3) võime muuta kasutades valemit (1) järgmiselt:

$$evB = e \frac{jB}{en} \Rightarrow$$

$$evB = \frac{jB}{n} \Rightarrow$$

$$\frac{jB}{n} = \frac{eU_H}{h} \Rightarrow$$

$$U_H = \frac{1}{en} jhB$$

Kuna voolutihedus $j = \frac{I}{S}$, kus I on voolutugevus ja S voolukontaktide pindala ja $S = ah$, siis

$$U_H = \frac{1}{en} \frac{IBh}{ah} \Rightarrow$$

$$U_H = \frac{1}{en} \frac{IB}{a}, \quad (4)$$

kus e on elementaarlaeng, n on põhiliste laengukandjate kontsentratsioon, I on vool läbi katsekeha, B on magnetiline induktsioon ja a katsekeha paksus. Valemis olevat esimest tegurit $\frac{1}{en}$ nimetatakse ka Halli koefitsiendiks. Tähistame seda siin ja edaspidi K . Valemist on näha, et Halli pinge on võrdeline voolutugevusega ja magnetilise induktsiooniga läbi katsekeha ning pöördvõrdeline katsekeha paksusega.

Valem (4) kajastab Halli efekti teooriat lihtsustatud kujul, sest sellisel juhul peab põhiliste laengukandjate kontsentratsioon olema palju suurem mittepõhiliste laengukandjate kontsentratsioonist. See tähendab, et valem kehtib lisandpooljuhtidele mitte väga kõrgetel temperatuuridel, sest siis muutub lisandpooljuhi juhtivus omajuhtivuseks. Samuti on Halli koefitsient eelpool avaldatud lihtsustatud kujul, täpsem kuju on järgmine:

$$K = \frac{r}{en},$$

kus r on nn Halli faktor. Selle väärtus sõltub laengukandjate mehhanismi hajumisest pooljuhis ja magnetvälja tugevusest¹ ja kõigub vahemikus 1...2. Lihtsustatud kujul võetakse r võrdseks ühega.

Lisandpooljuhi erijuhtivus σ on võrdne [3, 4]

$$\sigma = en\mu \quad (5)$$

ja kui me eksperimentaalselt mõõdame mingil meetodil σ ja Halli efekti mõõtmisest $r=1$ korral saame põhiliste laengukandjate kontsentratsiooni n , siis viimasest valemist (5) arvatud laengukandjate liikuvust nimetatakse Halli liikuvuseks. Ka antud töös on Halli faktor r võetud võrdseks ühega.

Juhul, kui tegemist on aktseptor pooljuhiga, siis kõikides ülaltoodud valemities elektronide kontsentratsiooni n asemel tuleb kasutada aukude kontsentratsiooni p .

1.2 Halli efekti mõõtmine

Halli efekti mõõtmise meetodeid on erinevaid, kuid kõige levinum meetod kasutab alalisvoolu ja alalismagnetvälja. See meetod on kõige lihtsam ja ka kasutusel selles töös. Teistest meetoditest võib nimetada meetodit, kus kasutatakse alalismagnetvälja ja vahelduvvoolu. Kasutades seda meetodit ei ole vaja teha mitmeid mõõtmisi ning meetod on tundlik ja täpne, sest võimaldab kasutada teatud sagedusega vahelduvvoolu ja kitsaribalist võimendit [1, 3]. See annab võimaluse vältida häireid, mis esinevad väikese Halli pinge korral, kuid mõõtmisaparatuur on keeruline. Ühe

¹ Magnetvälja tugevust arvutatakse valemist $\mu^2 B^2$ [1]. Kui $\mu^2 B^2 \gg 1$, siis magnetväli antud pooljuhi jaoks on tugev. Tugevas magnetväljas on Halli faktor $r=1$, ka nõrga magnetvälja puhul nihkub r sageli ühe poole. Antud töös on katsekehade kasutusel peamiselt räni katsekehad, mille jaoks laengukandjate liikuvus ei ületa $2000 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$. Kasutatud magnetvälja induksioon ei ületa 0,2 T, seega $\mu^2 B^2 = 1,6 \cdot 10^{-3} \ll 1$ ja võime magnetvälja lugeda nõrgaks.

meetodina kasutatakse veel vahelduvmagnetvälja ja alalisvoolu, kuid see meetod ei ole laialdaselt levinud.

Kõige keerulisemad on järgmised kaks meetodit [1]. Esimeses kasutatakse vahelduvmagnetvälja ja vahelduvvoolu erinevate sagedustega. Selle meetodi aparatuur on väga kallis ja keerukas ning mõõtmised on ka keerukad, kuid meetod võimaldab mõõta väga väikeseid Halli pingeid. See tähendab, et antud meetodiga on võimalik mõõta pooljuhte, mille laengukandjate liikuvus μ on väike. Kasutades asendust $\sigma = e n \mu$ võib valemit Halli pinge jaoks teisendada:

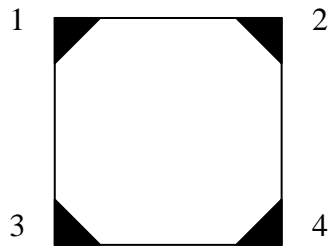
$$U_H = \frac{1}{e} \frac{\sigma}{\mu} \frac{IB}{a} \Rightarrow$$

$$U_H = \frac{\mu}{\sigma} \frac{IB}{a}$$

Teisendusest on näha, et kui liikuvus μ on väike, siis on väike ka Halli pinge.

Antud valemist on näha, et Halli pinge on võrdeline voolutugevusega, kuid suurendades voolutugevust läbi katsekeha, hakkab see Joul-Lentzi soojuse tõttu kuumenema. See toob esile termoelektromotoorse jõu tekkimise, mis segab Halli pinge mõõtmist ja vahel varjab seda. Selle välistamiseks kasutatakse impulssmeetodit, mille puhul lastakse läbi katsekeha lühiajalised suurevoolulised impulsid ja tekkiv Halli pinge mõõdetakse impulsis. Impulssmeetod ei ole samuti laialdaselt levinud.

Nagu varasemalt välja toodud, on selles töös kasutusel meetod, milles kasutatakse alalisvoolu ja alalismagnetvälja. Mõõtmistel kasutatakse enim ruudukujulist katsekeha, mille neli kontakti asuvad nurkades. Sellised katsekehad (joonis 2) on kasutusel ka selles töös.



Joonis 2. Kontaktide asetus katsekehal

Esimesena lastakse voolu läbi kontaktidest 1 ja 4 ja Halli pinget mõõdetakse kontaktidest 2 ja 3. Mõõtmisel tuleb jälgida, et Halli pinge oleks nii-öelda puhas, see tähendab, et magnetvälja puudumisel esineb kontaktidel 2 ja 3 pinge, mida võib nimetada jääkpingeks. Jääkpinge tekib, sest kontaktid 2 ja 3 ei asu praktiliselt kunagi täpselt ühel ekvipotentsiaalpinnaal. Mõõtmised peab sooritama erinevatel voolu ja magnetvälja suurustel ja polaarsustel ning neist leitakse aritmeetiline keskmine. Peale seda vahetatakse kontakte, voolu lastakse läbi kontaktide 2 ja 3 ning Halli pinget mõõdetakse kontaktidel 1 ja 4. Kokku saadakse 8 Halli pinge väärtust ja võetakse neist aritmeetiline keskmine [5].

Mõõtmisaparatuuris peab kasutama täpset milli-mikrovoltmeetrit suure sisendtakistusega, sest Halli pinge on sisuliselt elektromotoorne jõud ja pingemõõtja takistus peab olema suurem kui katsekeha takistus y -telje suunas (joonis 1). Tavaliselt vastavad nendele tingimustele numbrilised milli-mikrovoltmeetrid sisendtakistusega $R \geq 10 \text{ M}\Omega$.

Mõõtmisel peab voolutugevus läbi katsekeha olema konstantne ja seetõttu kasutatakse vooluallikana voolustabilisaatorit. Voolustabilisaator annab voolu, mis ei muutu, kui katsekeha takistus mõõtmiste käigus teatud piirides muutub.

2. KATSESEADE

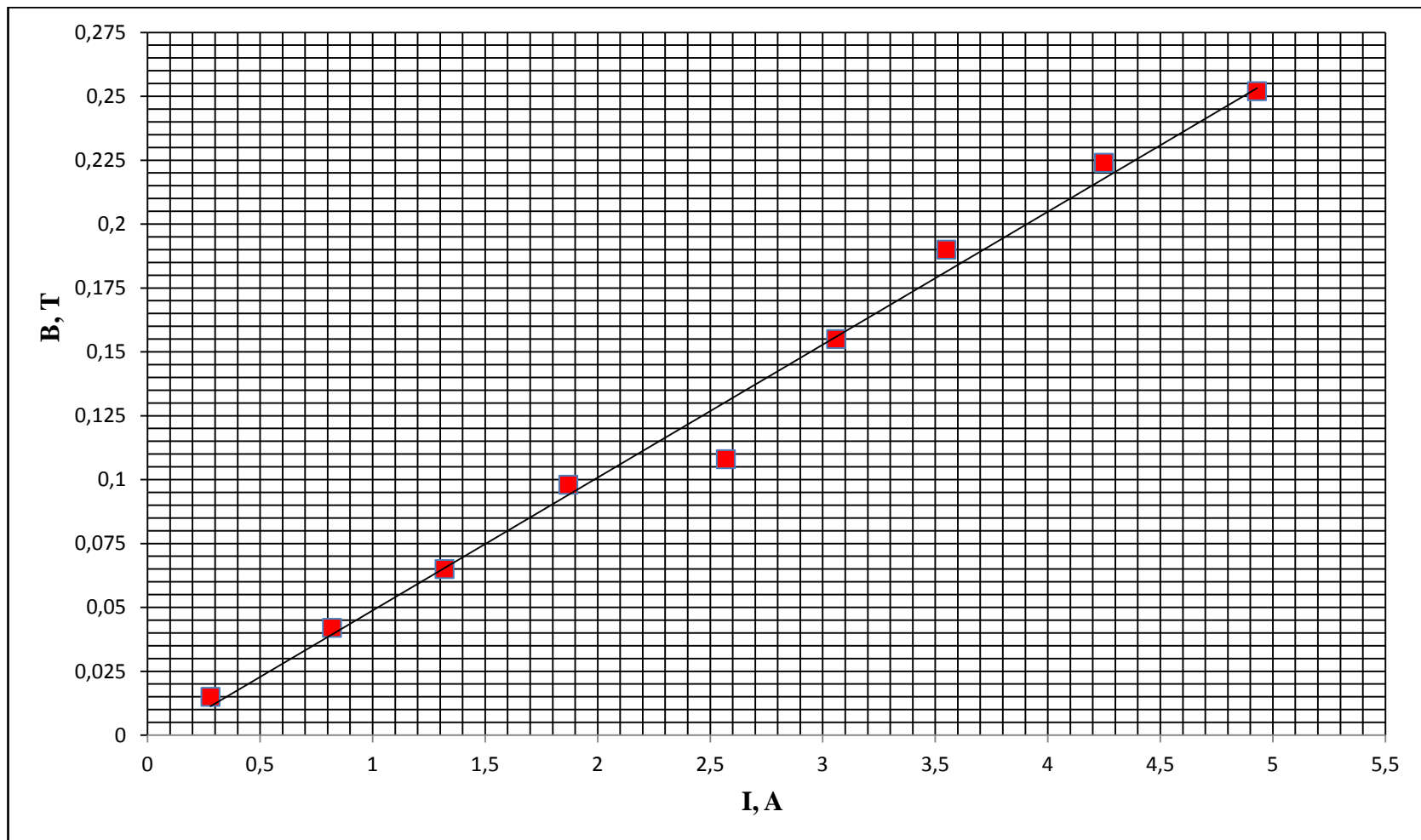
Katseseadme konstruktsioon ja tehnilised andmed on ette antud juhendaja poolt. Katseseade koosneb kahest osast – esimene osa on elektromagnet pilu laiusega 12 mm, magnetpooluste pindala pilu äärtes on 25x25 mm. Elektromagnet on valmistatud võrgutoite võimsusega 200 W transformaatori südamikuga peal. Mähis koosneb 600 keerust mähiseraadist läbimõõduga 1 mm. Südamiku plaatidesse on tehtud pilu ja seadme kinnitussüsteem.

Selle osa juurde kuulub ka katsekeha paigaldussüsteem, mille sisse on monteeritud neli elektroodi. Süsteem on konstrueeritud sellisena, et sinna saab täpselt asetada ruudukujulise katsekeha mõõtmetega 7...8*7...8 mm. Katsekeha pesa on selline, et kui see viia magnetpilusse, siis asetseb see alati ühe ja sama koha peal ning seega on katsekehale mõjuv magnetväli alati hea täpsusega ühesugune.

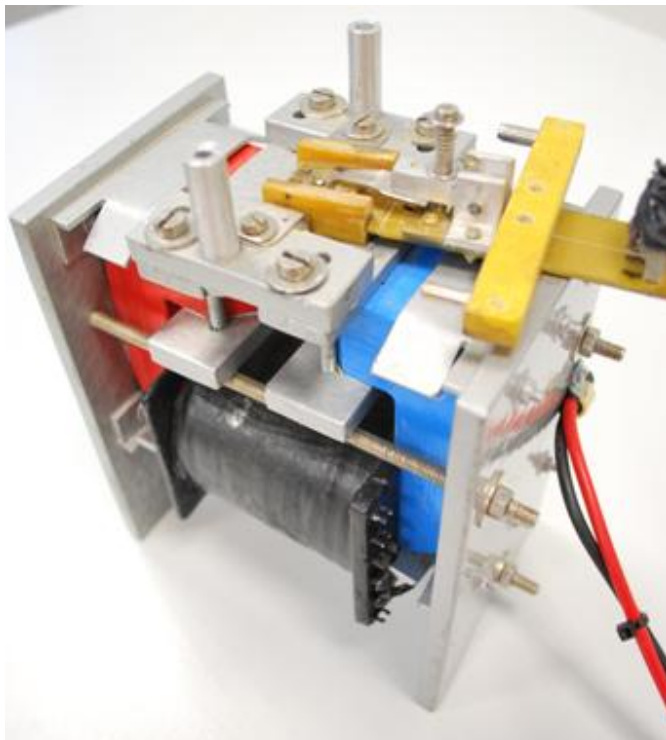
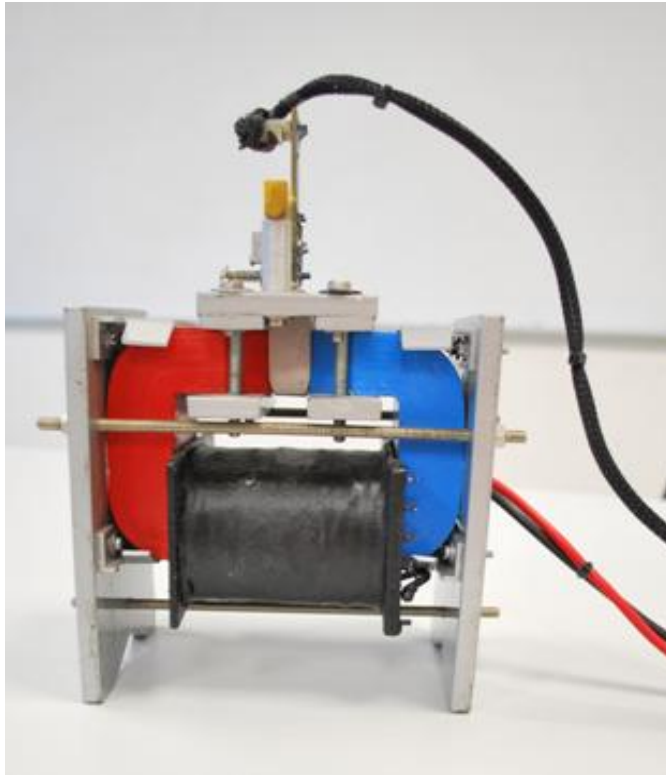
Esiolgu arvutamine, mis on tehtud varasemate tööde [3-6] alusel, näitas, et maksimaalne magnetilise induktsiooni väärtus voolutugevuse 3 A juures võiks olla umbes 0,2 T. Need arvutused ühtivad saadud tulemustega. Pärast katseseadme valmistamist viidi läbi mõõtmised ja magnetilise induktsiooni sõltuvus alalisvoolu tugevusest läbi mähise on näha graafikul (joonis 3). Kirjeldatud katseseadme osa on näha pildil (joonis 4).

Teise katseseadme osa kujutab endast kahte voolustabilisaatorit. Esimene kujutab endast allikat, mis annab stabiliseeritud alalisvoolu elektromagneti mähise jaoks vahemikus 0...3 A. Suurte voolude korral elektromagneti vasktraadi mähis kuumeneb ja selle takistus suureneb. Kui pingeline mähisel on konstantne, siis vool läbi mähise väheneb ja seetõttu väheneb ka magnetiline induktsioon pilus. Selle välistamiseks

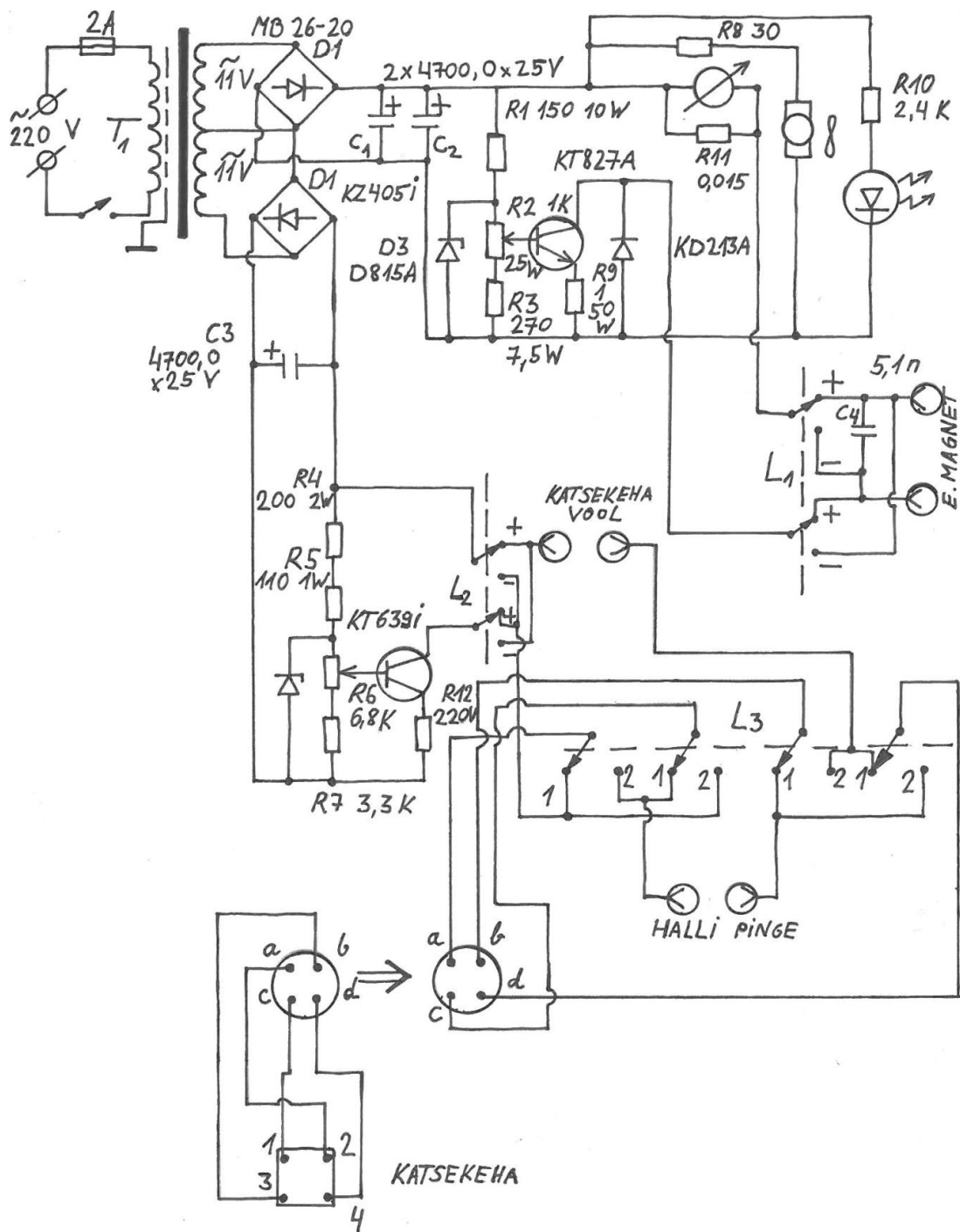
tuleb elektromagneti toitenä kasutada voolutugevuse stabilisaatorist, mille skeem on nähtav joonisel (joonis 5).



Joonis 3. Magnetilise induktsiooni sõltuvus alalisvoolu tugevusest läbi mähise



Joonis 4. Elektromagnet



Joonis 5. Katseseadme skeem

Stabilisaator on ehitatud võimsa Darlingtoni transistori KT827A peal. Antud stabilisaatori tööpõhimõtted on üksikasjalikult kajastatud töös [7]. Stabilisaator omab ümberlülitit L1, mille abil saab magneti mähises muuta voolusuunda ja sellega seoses magnetilise induktsiooni suunda pilus. Potentsiomeetriga R2 saab reguleerida voolutugevust mähises vahemikus 0...3 A ja sellega seoses induktsiooni vahemikus 0...0,16 T.

Teine osa kujutab endast analoogilist voolutugevuse stabilisaatorit, kuid väiksema võimsusega. Antud stabilisaator on ehitatud transistori KT639I peal ja selle ülesandeks on lasta stabiliseeritud voolu läbi katsekeha, mis on elektromagneti pilus ja on kaabliga ühendatud selle stabilisaatori väljundiga. Voolutugevust läbi katsekeha on võimalik reguleerida potentsiomeetriga R6. Potentsiomeeter R2, millega reguleeritakse voolutugevust läbi elektromagneti mähise, on tavaline 0,75 pöördega, kuid potentsiomeeter R6 on täpsuse tagamiseks 10pöördeline. Selle stabilisaatoriga saab voolutugevust reguleerida vahemikus 0...3,3 mA.

Voolu stabiliseerimine toimub 3 mA juures katsekeha takistuse jaoks vahemikus 0...4,5 k Ω . Väiksemate voolude juures see vahemik laieneb, näiteks voolutugevuse 0,5 mA jaoks on see vahemik 0...24,5 k Ω .

Voolu suunda läbi katsekeha on võimalik muuta ümberlülitil L2 abil. Ümberlülitiga L3 on võimalik vahetada katsekeha kontaktide paare. Kui ümberlülitil L3 on asendis 1, siis vool läbi kontakte 1 ja 4 ning Halli pinget mõõdetakse kontaktidest 2 ja 3. Kui viia ümberlülitil L3 asendisse 2, siis vool läbib kontakte 2 ja 3 ning Halli pinget mõõdetakse kontaktidelt 1 ja 4. Terve seade on nähtav järgmisel pildil (joonis 6).

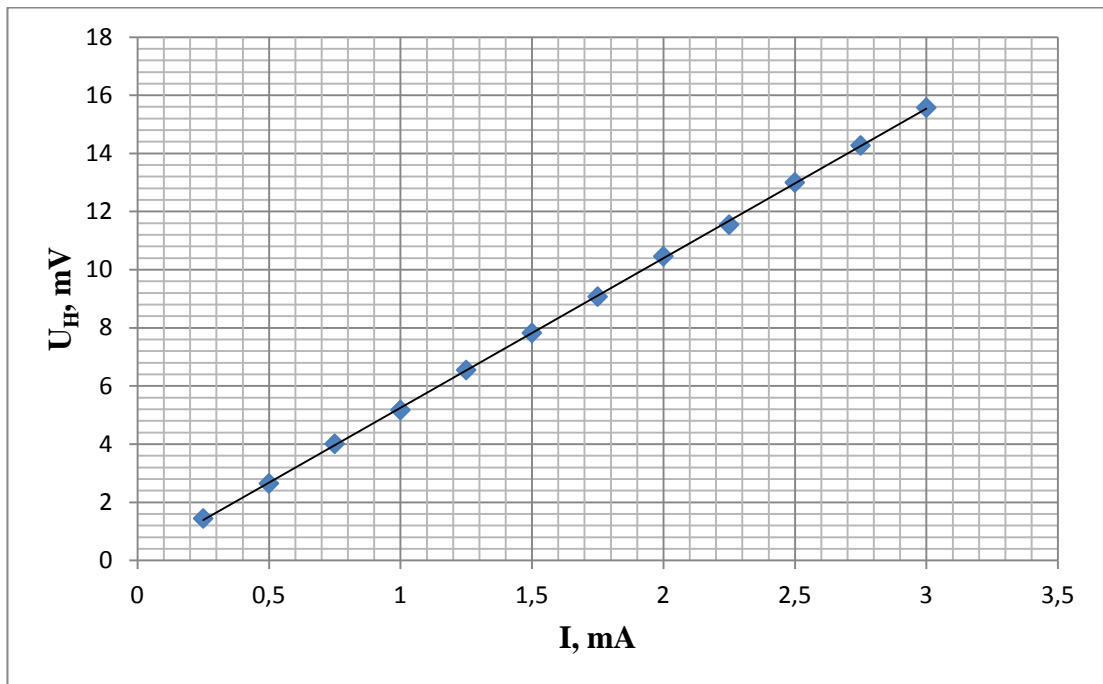


Joonis 6. Katseseade

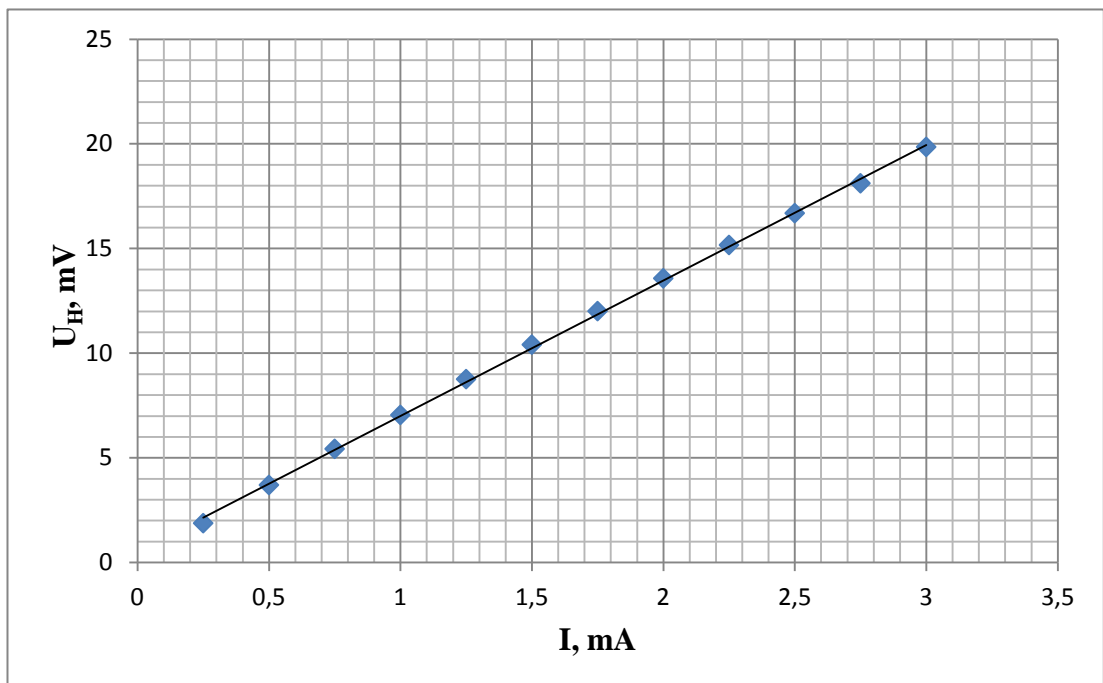
3. KATSETE TULEMUSED

3.1 Halli pinge ja voolutugevus läbi katsekeha

Esimese katse eesmärgiks oli kontrollida, kas Halli pinge on võrdeline voolutugevusega läbi katsekeha. Katse sooritamisel hoiti magnetvälja konstantsena - esimese katsekeha korral 0,143 T juures ja teise katsekeha korral 0,13 T juures. Muudeti voolutugevust I läbi katsekeha. Halli pinged leiti 12 voolutugevust kasutades ning katse sooritati kahel erineval katsekehal. Esimeseks katsekehaks oli keha B2 ja teiseks D2. Katsete tulemused on näha graafikutel (joonis 7, joonis 8). Nendest on näha, et graafikud on tõesti lineaarsed, nagu lihtsast teooriast tuletatav valem (4) eeldab.



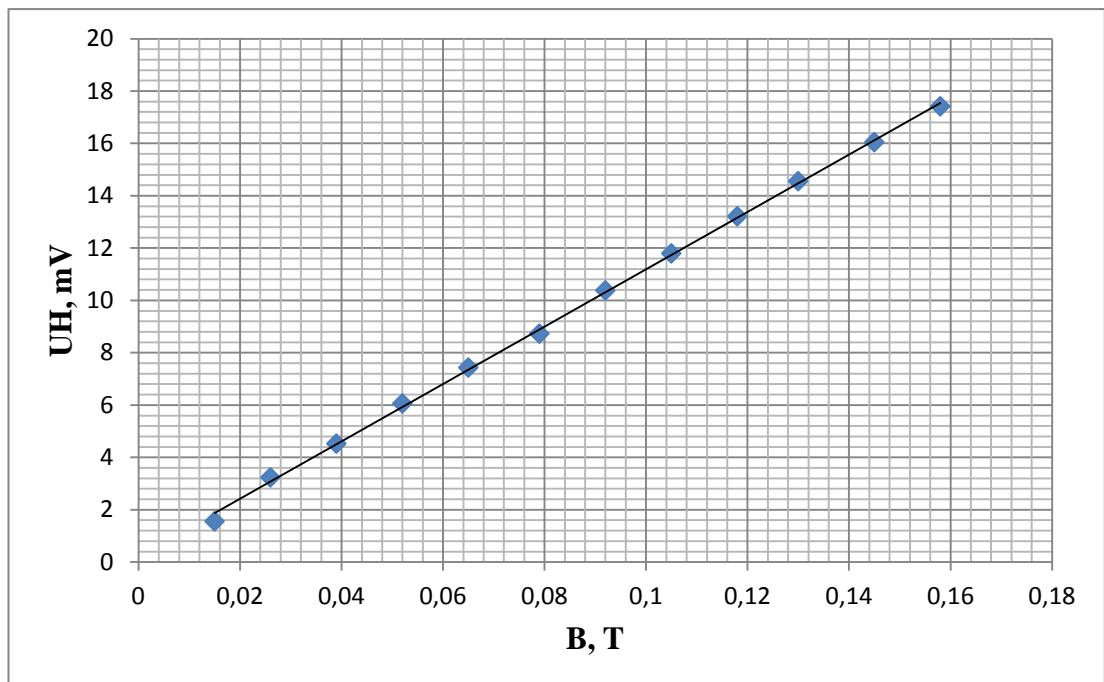
Joonis 7. Halli pinge sõltuvus voolutugevusest läbi katsekeha B2



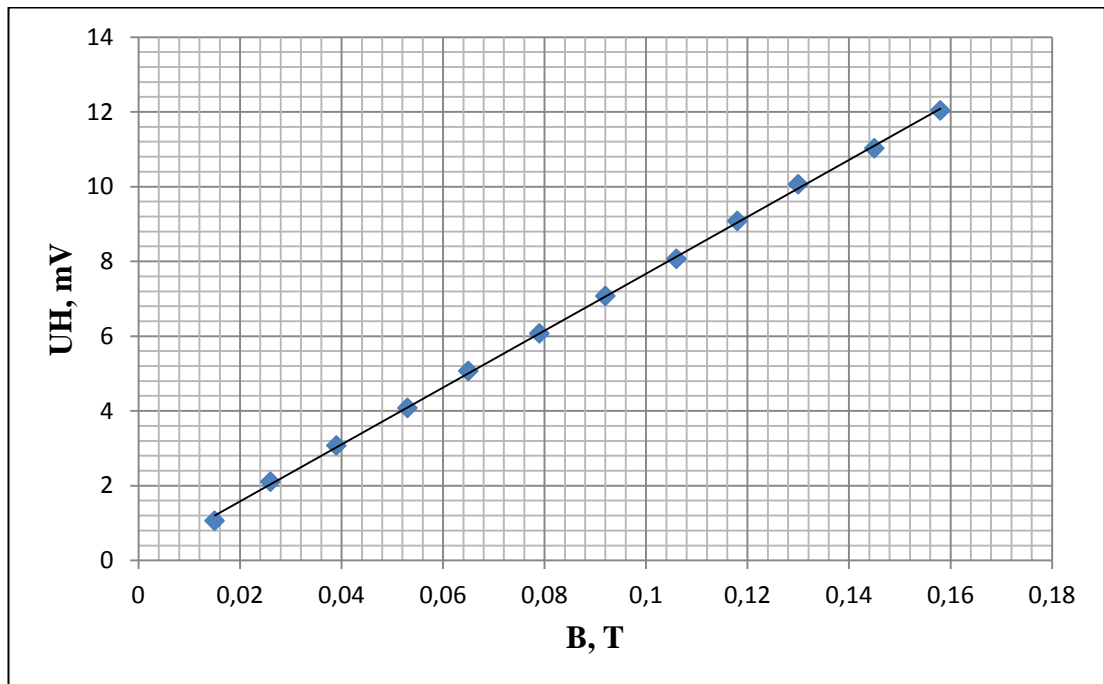
Joonis 8. Halli pinge sõltuvus voolutugevusest läbi katsekeha D2

3.2 Halli pinge ja magnetiline induksioon

Järgmise katse eesmärgiks oli kontrollida, kas Halli pinge on võrdeline magnetväljaga läbi katsekeha. Katse sooritamisel hoiti voolutugevust konstantsena – esimese katsekeha korral 3 mA ja teise katsekeha korral 1,5 mA. Muudeti magnetvälja B läbi katsekeha. Halli pinged leiti 12 magnetvälja tugevust kasutades ning katse sooritati kahel erineval katsekehal. Esimeseks katsekehaks oli keha B2 ja teiseks D2. Katse tulemused on näha graafikutel (joonis 9, joonis 10) ja mõlemad graafikud näitavad Halli pinge ja magnetilise induksiooni lineaarset sõltuvust, nagu töö alguses eeldatud on.



Joonis 9. Halli pinge sõltuvus magnetilisest induksioonist läbi katsekeha B2



Joonis 10. Halli pinge sõltuvus magnetilisest induksioonist läbi katsekeha D2

3.3 Halli pinge ja katsekeha paksus

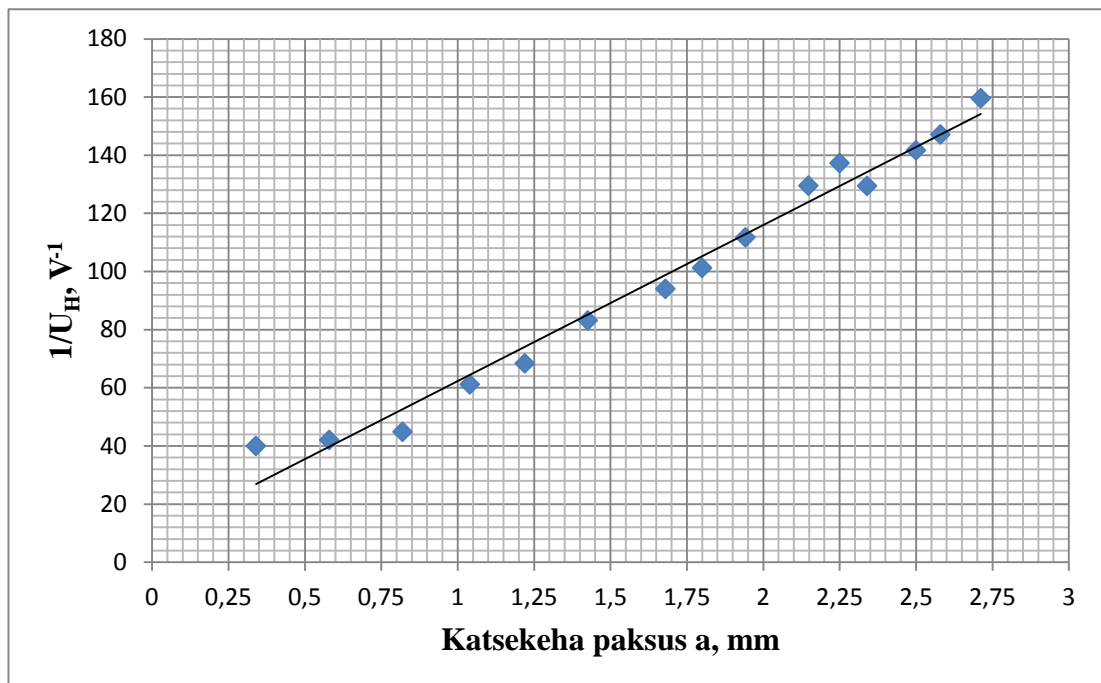
Valemist (4) on näha, et Halli pinge pöördväärtus on võrdeline katsekeha paksusega:

$$\frac{1}{U_H} = \left(\frac{en}{IB}\right) a$$

Kui tegemist on sama pooljuhiga, see tähendab, et kontsentratsioon n on konstantne ja kui hoida voolutugevust I ja magnetilist induksiooni B on konstantsena, siis graafik $\frac{1}{U_H} = f(a)$ peab olema lineaarne.

Lineaarsuse kontrollimiseks sooritati katsed kasutades 15 katsekeha, millel olid erinevad paksused, kuid mille ülejäänud parameetrid on praktiliselt samad, sest katsekehad on kõik valmistatud ühest suurest n-Si pooljuhi seibist. Katsekehade andmed on toodud lisa 1. Katsete käigus hoiti voolutugevust läbi katsekeha

konstantsena 1,5 mA juures ja magnetilist induktsiooni konstantsena 0,13 T juures. Katsete tulemused on näha graafikul (joonis 11). Graafikult on näha, et Halli pinge pöördväärtuse ja katsekeha paksuse vahel on lineaarne seos. Põhjus, miks kõik punktid ei asetse täpselt ühel sirgel, on see, et tegemist on küll samasuguste katsekehadega, kuid praktiliselt ei ole võimalik neile kõigile kanda identseid kontakte ja katsekehasid vahetati katseseadmes ning nende asukoht hoidja pesas oli mõnevõrra erinev. Sellepärast esinevadki mõned kõrvalekalded lineaarsest graafikust.



Joonis 11. Halli pinge sõltuvus katsekeha paksusest

3.4 Halli pinge ja põhiliste laengukandjate kontsentratsioon

Valemist (4) on näha, et Halli pinge pöördväärtus on võrdeline katsekeha laengukandjate kontsentratsiooniga:

$$\frac{1}{U_H} = \left(\frac{ea}{IB}\right)^n$$

Graafiku konstrueerimiseks on vaja teada Halli pinget ja erinevast pooljuhtmaterjalist katsekehade laengukandjate kontsentratsiooni.

Kuna katsekehade paksus võib olla erinev, aga voolu läbi katsekeha ja magnetilise induksiooni võib hoida konstantsena, siis viimase valemi võib kirjutada kujul:

$$\frac{1}{U_{Ha}} = \left(\frac{e}{IB}\right)^n = bn$$

Uurimisobjektideks olevates katsekehades on põhiliste laengukandjate kontsentratsioon mitme suurusjärgu võrra erinev. Seetõttu on mõistlik funktsiooni $\frac{1}{U_{Ha}} = f(n)$ graafik, mis peaks olema sirge, esitada logaritmilises mastaabis:

$$\log\left(\frac{1}{U_{Ha}}\right) = \log b + \log n$$

Eksperiment sooritati kasutades 8 erinevat katsekeha. Kolm neist oli n-Si tüüpi, üks p-Si, üks p-Ge, üks n-GaAs ja kaks InSb. 6 esimese katsekeha korral sooritati esimesena eritakistuse mõõtmine. Eritakistuse määramiseks kasutatakse tavaliselt niinimetatud sondimeetodeid. Enim levinud on neljasondilised meetodid [3] ja selles töös kasutati Van der Pauw meetodit [5]. Katsekeha neljale kontaktile (joonis 2) asetatakse sondid. Sondide abil juhitakse läbi kontaktide 1 ja 2 vool tugevusega I ning kontaktide 3 ja 4 vahel mõõdetakse pinge U_1 ja leitakse takistus R_1 :

$$R_1 = \frac{U_1}{I}$$

Peale seda juhitakse sama tugevusega vool I läbi kontaktide 3 ja 4 ning kontaktide 1 ja 2 vahel mõõdetakse pinge U_2 ja leitakse takistus R_2 :

$$R_2 = \frac{U_2}{I}$$

Teoreetiline analüüs näitab, et antud katsekeha eritakistuse saab leida valemiga [5]:

$$\rho = 2,27 * a * (R_1 + R_2) * f\left(\frac{R_1}{R_2}\right),$$

kus a on katsekeha paksus ja $f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ parandusfunktsioon, mille väärtused saab leida tabelist [5]. Parandusfunktsiooni väärtus sõltub takistuste suhtest, kuid erineb tavaliselt vähe ühest. Selle arvutamisel tuleb jagada suurem takistuse väärtus väiksemaga. Katseseadet eritakistuse mõõtmiseks võib näha pildil (joonis 12).

Eritakistuse abil on võimalik leida katsekehade kontsentratsioon. Kuna antud töös kasutusel olevad katsekehad on standardsed, siis kontsentratsiooni saab leida graafikult, kus on toodud eritakistuse ja kontsentratsiooni sõltuvuse kõverad [8]. Antud graafikut võib näha joonisel (joonis 13).

Kui rääkida kahest indiumantimoniid (InSb) katsekehast, siis antud juhul on kasutusel suhteliselt puhtad katsekehad. Laengukandjate omakontsentratsiooni indiumantimoniidis katsekehades võib arvutada järgmise valemi järgi [10]:

$$n_i = 6 * 10^4 * T^{3/2} * e^{-0,26/(2kT)},$$

kus k on Boltzmanni konstant ja T termodünaamiline temperatuur. Valem kehtib temperatuurivahemikus 200...600 K ja korrutis kT peab olema avaldatud elektronvoltides. Temperatuuriks on toatemperatuur 300 K.

$$kT = 1,38 * 10^{-23} * 300 = 4,14 * 10^{-21} \text{ J} = 0,0259 \text{ eV}$$

Laengukandjate omakontsentratsioon on antud juhul $n_i = 2 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Kui tegemist on puhta indiumantimoniid pooljuhiga, siis on juba toatemperatuuri juures saavutatud omajuhtivus, kus elektronide kontsentratsioon on võrdne aukude kontsentratsiooniga. See on tingitud väikesest keelutsooni laiusest, mis

toatemperatuuri juures on umbes 0,17 eV. Võrdluseks võib tuua näiteks ränist pooljuhi, kus toatemperatuuri korral on keelutsooni laius 1,1 eV.

Omajuhtivusega pooljuhis on Halli koefitsient avaldatav kujul [9]

$$K = \frac{(1-b)}{e(1-b)n_i},$$

kus e on elektroni laeng ja b elektronide liikuvuse μ_n ja aukude liikuvuse μ_p suhe. Indiumantimoniid pooljuhtides on elektronide liikuvus väga suur ja toatemperatuuri juures on elektronide liikuvuse maksimaalseks väärtuseks umbes $77\,000 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$, aga aukude liikuvuseks umbes $700 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ [9]. Sellest tulenevalt on Halli koefitsient hea täpsusega järgmine:

$$K = \frac{1}{en_i}$$

Sellest tulenevalt sõltub eritakistuse väärtus täpsusega umbes 1% ainult elektronide kontsentratsioonist. Kontsentratsiooni n võib arvutada valemist:

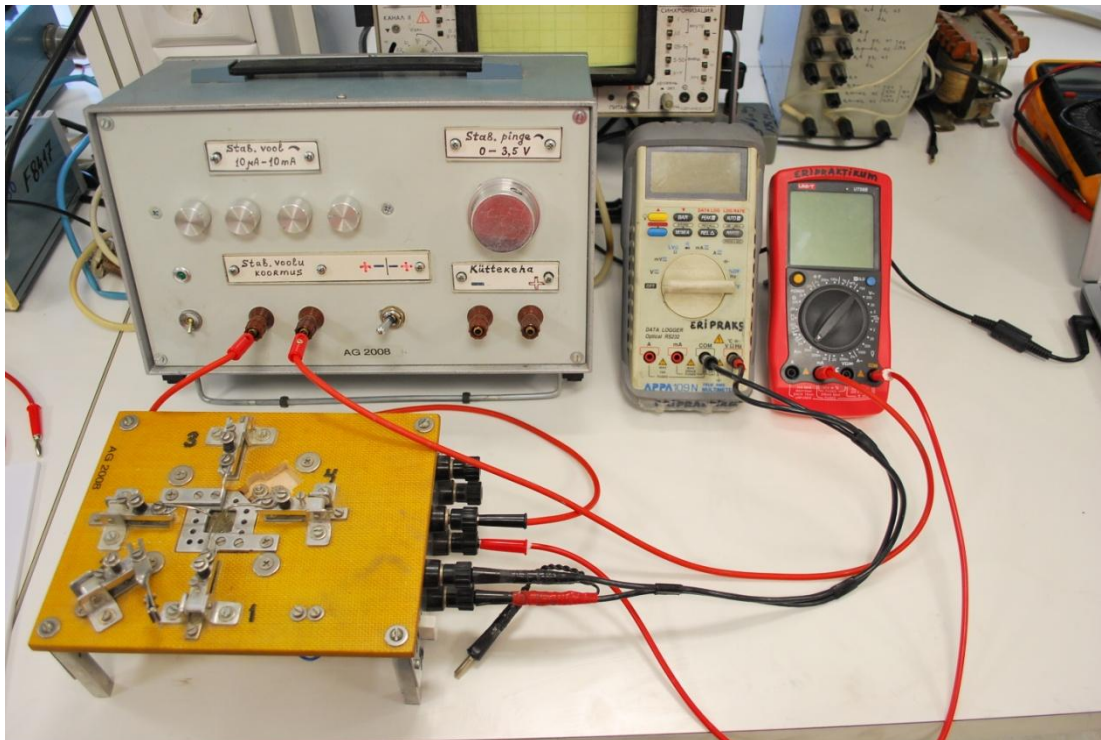
$$n_i = \frac{1}{e\rho\mu_n},$$

kus e on elektroni laeng, ρ eritakistus ja μ_n elektronide liikuvus. Mõlema indiumantimoniid katsekeha korral arvestati, et põhiliste laengukandjate liikuvus on umbes $60\,000 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$. Põhilisteks laengukandjateks on elektronid. See suurus on varasemalt mõõdetud indiumantimoniidi magnetakistuse mõõtmise eksperimendis [7]. Eritakistus ρ mõõdeti Van der Pauw meetodil. Mõlema indiumantimoniid katsekeha jaoks oli kontsentratsioon vahemikus $2...3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, mis oli ka oodatav tulemus.

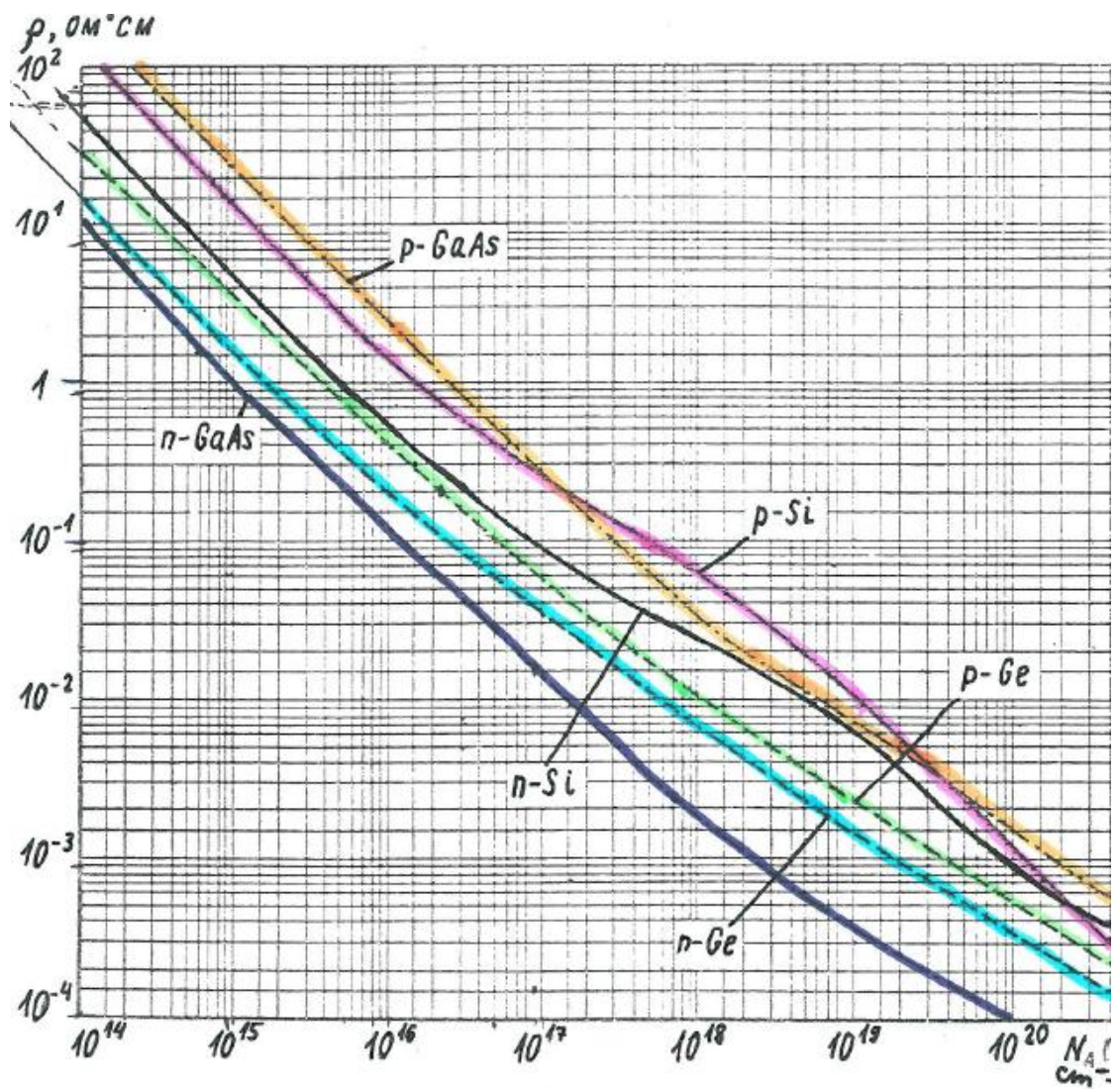
Katses kasutati erinevatest materjalidest katsekehasid A2, A3, B3, V3, G3, D3, E3, ja Z3. Katsekehade andmeid on toodud lisa 1. Katse sooritamisel hoiti voolu

konstantsena 1,5 mA juures, indiumantimoniid katsekehade korral 8 mA juures, sest antud materjali korral on Halli pinge väga väike ning selle registreerimiseks peab kasutama tugevamat voolu.

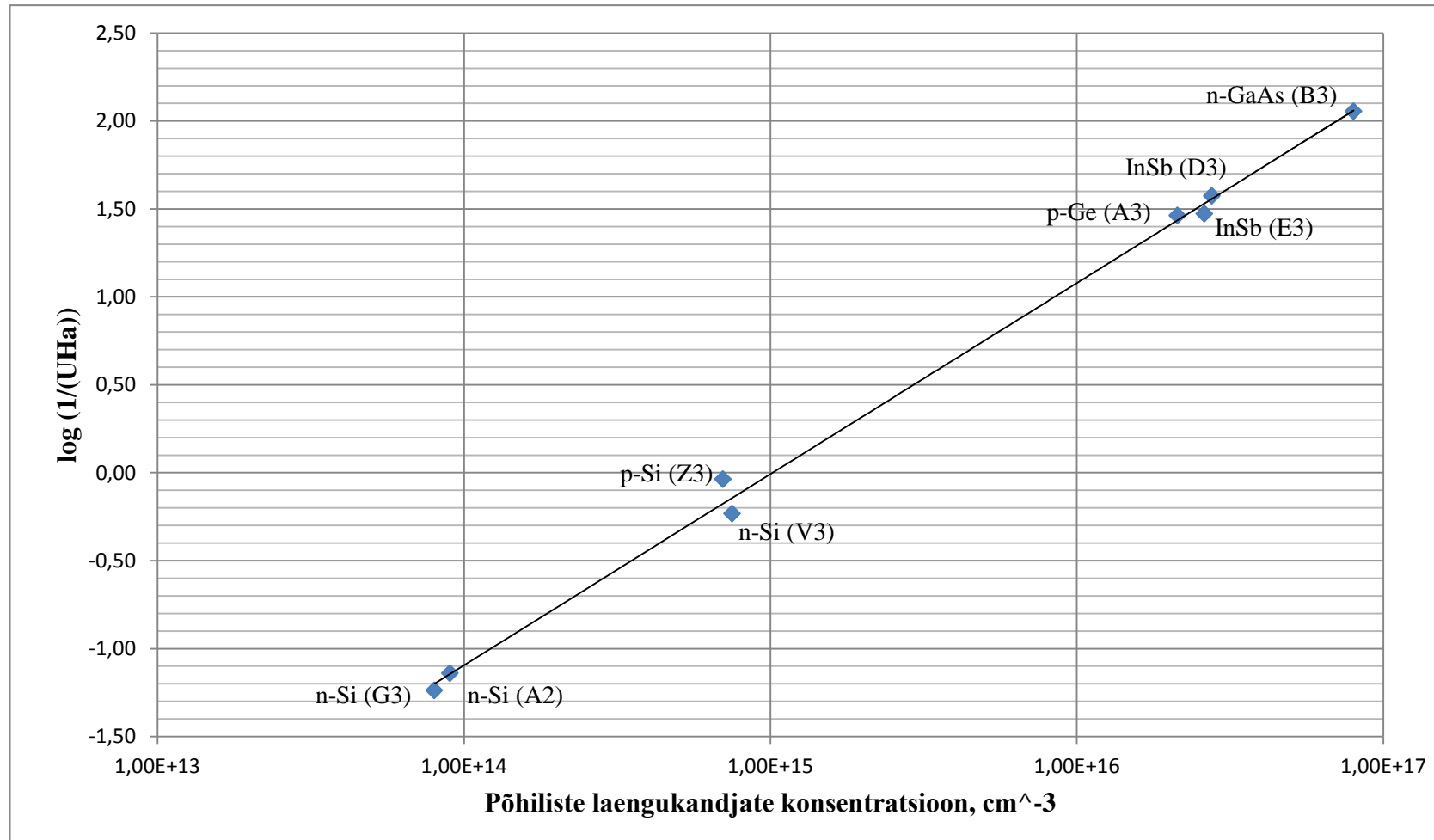
Kõikide katsete tulemused on näha joonisel (joonis 14). $\log\left(\frac{1}{U_{Ha}}\right)$ ja $\log n$ vahel on tõesti lineaarne seos. Võrreldes eelmiste katsete tulemustega esinevad selle katse juures märgatavad mõõtmisvead. Tõenäoliselt on nad peamiselt tingitud sellest, et katsed olid kaheosalised – iga katsekeha korral mõõdeti eraldi aparatuuri kasutades alguses Halli pinge ja seejärel eritakistus.



Joonis 12. Katseseade eritakistuse mõõtmiseks



Joonis 13. Eritakistuse ja kontsentratsiooni sõltuvus



Joonis 14. Halli pinge ja põhiliste laengukandjate kontsentratsiooni sõltuvus

KOKKUVÕTE

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks oli tutvuda Halli efektiga ning Halli pinge uurimine. Töö käigus kontrolliti eksperimentaalselt, kas lihtsast teooriast tuletatav Halli pinge valem kehtib. Kontrolliti, kas Halli pinge on võrdeline voolutugevusega läbi katsekeha ja magnetvälja induksiooniga. Eksperimendid katsekehadega näitasid, et võrdelisus kehtib mõlemal juhul.

Katseliselt kontrolliti ka, kas Halli pinge on pöördvõrdeline katsekeha paksusega. Ka see vastab tõele, kuid katsete tulemused ei olnud enam nii väikeste mõõtevigaadega, kui kahe eelmise eksperimendi tüübi korral. See on ilmselt põhjustatud katsekehade vahetamisest katseseadmes katse käigus.

Halli pinge ja põhiliste laengukandjate kontsentratsiooni pöördvõrdelisuse kontrollimiseks kasutati erinevaid pooljuhte. Katsete tulemusena selgus, et seos on pöördvõrdeline, nagu teooriast võib eeldada, kuid ka siin esinesid mõningased mõõtemääramatused.

Kõik eksperimendid Halli pinge valemi kontrollimisel viidi läbi ja katsete tulemused kinnitasid, et erinevate suuruste vahel on tõesti võrdelised ja pöördvõrdelised seosed. Seega antud töö eesmärk on täidetud.

Käesolev töö on kirjutatud nii, et seda oleks sobilik kasutada üksikasjaliku juhendina tehnilise füüsika bakalaureuseõppe tudengitele pooljuhtide praktikumi sooritamiseks õppeaines YFR4711 Eripraktikum I.

SUMMARY

Research of Hall Effect in semiconductors

The current thesis concentrates on Hall Effect. Hall Effect is the appearance of a voltage difference (the Hall voltage) across an electrical conductor, transverse to an electric current in the conductor and a magnetic field perpendicular to the current. It was discovered by Edwin Herbert Hall in 1879.

Simple theory shows that Hall voltage can be calculated from the following formula

$$U_H = \frac{1}{en} \frac{IB}{a},$$

where U_H is the Hall voltage, I is the current intensity, B is the magnetic induction, e is the charge of an electron, n is concentration of majority carriers and a is the thickness of a semiconductor.

Purpose of this thesis was to experimentally check the formula and show that Hall voltage is proportional to current intensity and magnetic induction and inversely proportional to concentration of majority carriers and thickness of a semiconductor. Second purpose was to write this work in a way that it could be used as a laboratory work in subject Special Lab.

When checking the proportional relationship of Hall voltage and current intensity and magnetic induction, test with two semiconductors were done. Experiments for both test samples showed linearity as predicted the formula.

Tests with 15 semiconductor samples with different thickness were made to check inversely proportional relationship of Hall voltage and thickness of semiconductors. Experiments showed inversely proportional relationship as predicts the theory.

In the last experiment, 8 different semiconductor samples were tested to check inversely proportional relationship of the Hall voltage and concentration of majority carriers. The results of this experiment agree with the theory.

This testing device and work can be used as a detailed instruction for students in Special Lab.

All the purposes for this work were executed and therefore we can say that the work filled its purpose.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Kutšis, E. V. (1974). Halli efekti uurimise meetodid. Moskva: Sov. Raadio (vene keeles)
2. Hall, E. H. (1879). On a new action of the magnet on electric currents. *American Journal of Mathematics* 2, N3, 287-292
3. Gavrilov, A., Ruus, T. (2005). Pooljuhtmaterjalide põhiparameetrite mõõtmine. Tallinn: TTÜ kirjastus
4. Saveljev, I. (1978). Füüsika üldkursus 2: elekter. Tallinn: Valgus
5. Gavrilov, A. (2011). Pooljuhtmaterjalide elektriliste parameetrite mõõtmine. Tallinn: TTÜ kirjastus
6. Abo, L. (1981). Raadioseadmete üksikosad. Tallinn: Valgus
7. Kaljulaid, J. (2010). Magnetvälja mõju pooljuhtide eritakistusele. Bakalaureusetöö. Tallinn: TTÜ
8. Fedotov, J. A. (1969). Pooljuhtseadmete füüsika alused. Moskva: Sov. Raadio (vene keeles)
9. Šalimova, K. V. (1976). Pooljuhtide füüsika. Moskva: Energia
10. Madelung, O. (1964). *Physics of III-V compound*. New York-London-Sydney

LISAD

Lisa 1 Katsekehade andmed

Katsekeha tähistus	Läbimõõt a, mm	Materjal	Eritakistus ρ , $\Omega^* \text{cm}$
A1	2,712	n-Si (valmistatud kõik ühest 3 mm paksusest pooljuhi seibist)	58
V1	2,500		
B1	2,340		
G1	2,148		
D1	1,942		
E1	1,680		
Š1	1,426		
Z1	1,220		
I1	1,040		
K1	0,820		
A2	0,580		
B2	2,580		
G2	2,250		
D2	1,800		
E2	0,350		
A3	0,280	p-Ge	0,200
B3	0,800	n-GaAs	0,0156
V3	0,370	n-Si	6,2
G3	0,630	n-Si	67
D3	1,110	InSb	0,00378
E3	1,160	InSb	0,00400
Z3	0,530	p-Si	18,1

Lisa 2 Mõõteseadmete andmed

1. Milli-mikrovoltmeeter APPA109N
2. Milli-ampermeeter UT58B
3. Takistusmõõtja MY64