

## FysA220/1 Hallin ilmiö

Assistentti:

Arvostellaan

Työ jätetty:

### **Abstract**

When a p-type germanium-semiconductor crystal is in magnetic field, charged particles are affected by Lorentz force, which is orthogonally with control current. Particles move to the edge and create a Hall voltage. This is called as Hall effect. Hall voltage change if control current or temperature change. Using measuring results one can calculate the Hall constant, electric charge density and charge mobility. Using measurement results of Hall voltage as a function of control current the Hall constant is  $R_H = (7 \pm 0,4)10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$  and using measurement results of Hall voltage as a function of temperature, Hall constant is  $R_H = (9,0 \pm 0,4)10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$ . These results are remarkably larger than a theoretical value  $R_H = (4,17 \pm 0,08)10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$  for p-type germanium-semiconductor crystal. This may be due to the magnetic disturbance in sensor.

# 1 Johdanto

Työssä tutkitaan Hallin ilmiötä [1], jonka keksi Edwin Hall. Hallin ilmiössä magneettikenttää kohtisuorasti on asetettu johdin, jossa on liikkuvia varauksia. Tässä työssä johteena käytetään Ge-kidettä, joka on puolijohde. Magneettikenttä aiheuttaa liikkuviin varauksiin Lorenzin voiman, joka on kohtisuora sekä johtimen että magneettikentän suhteen. Siten johtimen toiselle reunalle kertyy negatiivista varausta ja toiselle reunalle positiivista varausta. Tässä syntyy Hall-jännite ja sähkökenttä, jonka aiheuttama voima kumoaa magneettikentän aiheuttaman voiman.

## 2 Teoreettiset lähtökohdat

Kun sähkömagneettisessa kentässä liikkuu varaus, siihen kohdistuva Lorenzin voima on

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (1)$$

missä  $\vec{E}$  on sähkökenttä,  $\vec{v}$  varausten nopeus ja  $\vec{B}$  magneettikenttä. Koska magneettikenttä aiheuttaa varauksiin voiman oikean käden säännön mukaisesti, kiteen voiman suuntaiseen seinään tulee vastakkainen merkkinen kokonaisvaraus kuin voiman tulosuuntaan jäävään seinämään, eli se polarisoituu. Tämä aiheuttaa sähkökentän, jonka aiheuttama voima kumoaa magneettikentän aiheuttaman voiman, joten kokonaisvoima on nolla:

$$F = q(E + vB) = 0 \quad (2)$$

$$\Rightarrow E = -vB. \quad (3)$$

Ohjausvirta on  $I_p$ , varauskuljettajien tiheys tilavuusyksikköä kohti on  $n$  ja virrantiheys saadaan laskettua yhtälöllä

$$j = nqv \Rightarrow v = \frac{j}{nq}. \quad (4)$$

Sijoittamalla  $v$ :n arvo yhtälöön 3 saadaan

$$E_x = \frac{-jB}{nq}, \quad (5)$$

josta saadaan Hallin vakio

$$R_H = \frac{1}{nq}. \quad (6)$$

Se voidaan esittää myös muodossa

$$|R_H| = \frac{E}{jB} = \frac{U_H d}{I_p B}, \quad (7)$$

missä  $U_H$  on Hallin jännite ja  $d$  Ge-kiteen paksuus. Levyn johtavuus saadaan yhtälöllä

$$\sigma = \frac{l}{RA}, \quad (8)$$

missä  $l$  on levyn pituus,  $A$  pinta-ala ja  $R$  resistanssi, joka saadaan puolijohdelevyn jännitteen ja sen läpi kulkevan virran avulla tutulla kaavalla  $R = \frac{U_G}{I_p}$ . Kun tiedetään johtavuus, voidaan laskea varauksen kuljettajien liikkuvuus yhtälöllä

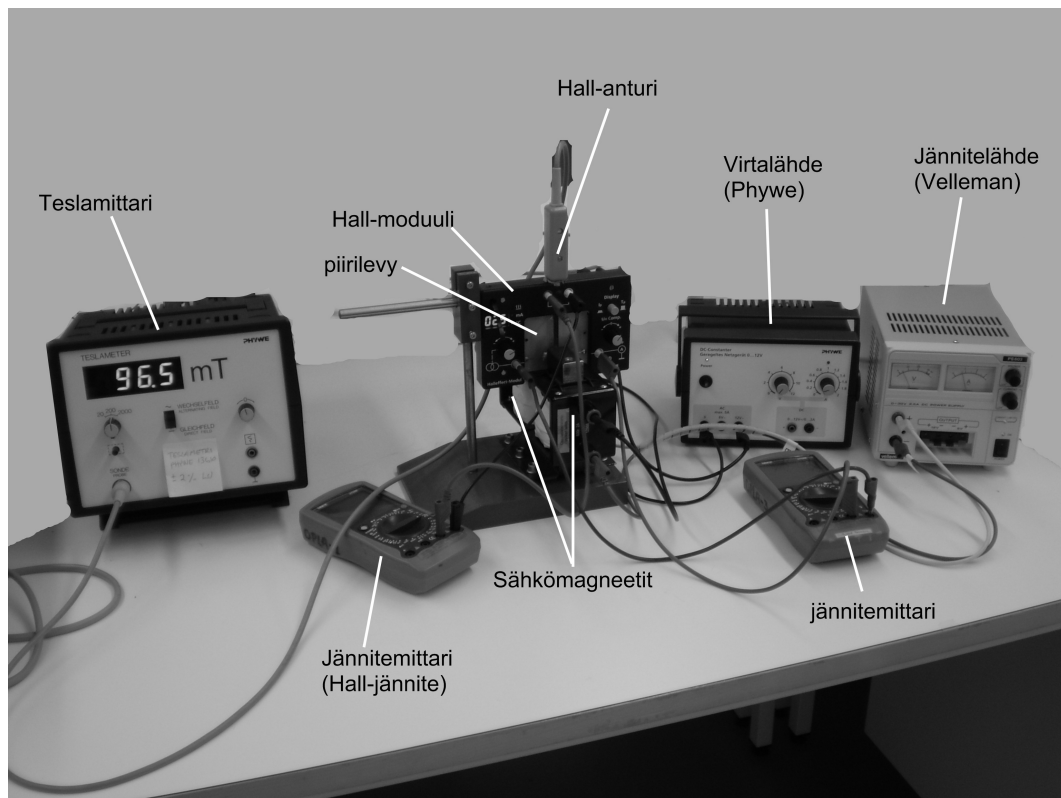
$$\mu = \frac{\sigma}{nq} = \sigma R_H. \quad (9)$$

Virheen laskemiseen käytetään yleistän virheenetenemislakia

$$\delta f = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i\right)^2} \quad (10)$$

### 3 Mittauslaitteisto ja kokeelliset menetelmät

#### 3.1 Laitteisto



Kuva 1: Koelaitteisto

Mittauksissa käytetty laitteisto on kuvassa 1. Hall-moduuliin (Phywe 600170) oli asennettu valmiiksi piirilevy, jossa Ge-hila sijaitsi. Hall-moduuli sai virtalähteestään (Phywe 13505 93) sekä ohjausvirran että lämmitysvirran. Moduulin alaosaan oli asennettu rautasydämiset 600-kierroksiset käämit, eli sähkömagneetit (S-VET, 2A 12966) siten, että niiden magneettikenttä oli kohtisuorassa piirilevyä vastaan. Sähkömagneetit oli kytketty jännitelähteeseen (Velleman, PS 603, DC Power Supply). Moduulin yläpuolelta systeemiin kiinnitettiin Hall-anturi piirilevyn suuntaisesti rautasydämien väliin. Anturi oli kytketty teslamittariin (Phywe 13610). Hall-jännitettä mitattiin jännitemittarilla UNI-T (UT58B, ”OPLA 1”) ja piirilevyn jännitteen mittarilla UNI-T (UT58B, ”OPLA 3”).

## 3.2 Mittaukset

Aluksi tein systeemiin kytkennän, kiinnitin virtalähteet, teslamittarin ja jännitemittarit laitteistoon. Moduuli Hall-antureineen ja piirilevyineen oli valmiiksi asennettu. Kokeilin systeemin laitteiden toiminnan ja mittarit tuntuivat antavan järkeviä lukemia.

Ensimmäisessä varsinaisessa mittauksessa kalibroin moduulista Comp-säätönappulaa siten, että Hall-jännite  $U_H$  näytti jännitemittarissa nollaa, kun magneettikenttä  $B$  oli nolla. Sitten mittasin laboratorion huonelämpötilan, joka moduulin näyttämän mukaan oli  $20^\circ\text{C}$ . Magneettikentäksi säädin  $B = 0,0995\text{ T}$ . Mittasin Hallin jännitteen sekä Ge-kiteen päiden välisen jännitteen arvoja ohjausvirran funktiona  $0,005\text{ A}$ :n välein nostaan ohjausvirtaa arvosta  $-0,030\text{ A}$  arvoon  $0,030\text{ A}$ .

Toisessa mittauksessa kalibroin taas Hall-jännitteen lukeman näyttämään nollaa nollamagneettikentässä. Tarkoitus oli edelleen pitää lämpötila vakiona, moduulin näyttämä lämpötilalle oli tämän mittauksen alussa  $T = 21^\circ\text{C}$ . Mittauksen lopussa lämpötilan näyttämä näytti hiukan nousseen, lukema väpätti  $21^\circ\text{C}$ :n ja  $22^\circ\text{C}$ :n välillä. Ohjausvirraksi säädin  $I_p = 0,025\text{ A}$ . Sitten mittasin Hall-jännitteen arvoa magneettikentän funktiona.

Kolmannessa mittauksessa oli määritettävä magneettikenttä ja ohjausvirta vakioksi. Säädin ohjausvirraksi  $I_p = 0,030\text{ A}$ . Painoin moduulin lämmitysnapulaa ja odottelin, että laite lämpenee maksimilämpötilaansa  $T = 170^\circ\text{C}$  ja säädin magneettikentän näyttämään arvoa  $0,090\text{ T}$ . Sitten kirjoitin ylös  $U_H-T$  -lukemapareja kymmenen asteen välein systeemin jäähtyessä. Aluksi systeemi jäähtyikin melko nopeasti ja oli kiire merkitä ylös lämpötilaa vastaavia Hall-jännitteen arvoja. Lopuksi jäähtyminen hidastui huomattavasti. Tämän mittauksen aikana huomasin, että systeemiä lämmittäessä magneettikenttä pienenee ja jäähdyttäessä se pienenee, vaikka sen pitäisi pysyä vakiona.

## 4 Havainnot ja laskut

Laittevalmistajan mukaan työssä käytetyllä Ge-kiteellä on taulukon 1 mukaiset ominaisuudet.

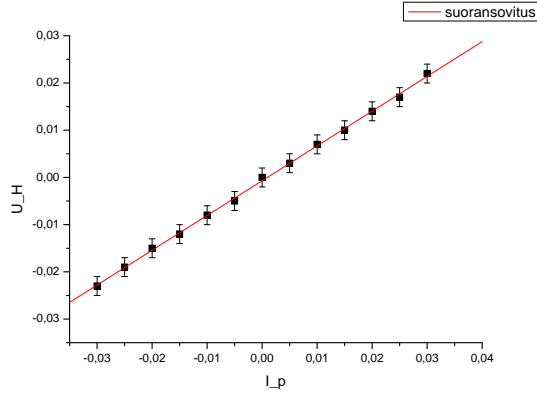
Taulukko 1: Ge-kiteen ominaisuudet.

paksuus $d$	$0,001\text{ m}$
pituus $l$	$0,022\text{ m}$
poikkipinta-ala $A$	$10^{-5}\text{ m}^2$
$R_H$ (p-tyypin kide)	$(4,17 \pm 0,08)10^{-3}\frac{\text{m}^3}{\text{As}}$
$R_H$ (n-tyypin kide)	$(4,8 \pm 0,02)10^{-3}\frac{\text{m}^3}{\text{As}}$

## 4.1 Hall-vakio

### 4.1.1 $U_H(I_p)$ -mittaus

Hallin vakion määrittämiseksi plottasin liitteen [1] ensimmäisen mittauksen mittaustuloksista  $U_H-I_p$  -arvoparit kuvaajaan OriginPro 7.5:lla. Tein pistepareille suoransovituksen, jonka painotin Hall-jännitteen virheellä. Jännitemittarin virhe määritellään siten,



Kuva 2: Hall-jännite ohjausvirran funktiona ja sovitettu suora.

että summataan 0,05% lukemasta ja yksi digitti mittarin lukemasta. Eli virheen laskin kaavalla

$$\delta U_H = 0,005U_H + 0,001V. \quad (11)$$

Esimerkiksi Mittauspöytäkirjan 1. mittauksen ensimmäisen Hall-jännitteen arvon virheen laskin seuraavasti:

$$\delta U_H = 0,005 \cdot 0,023V + 0,001V = 0,001115V \approx 0,002V. \quad (12)$$

Sovitetun suoran yhtälöstä saadaan  $U_H(I_p)$ -kuvaajan kulmakerroin  $\frac{dU_H}{dI_p} = 0,74 \pm 0,03 \frac{V}{A}$ , joka siis vastaa pisteparien  $U_H-I_p$  keskimääräistä arvoa termille  $\frac{U_H}{I_p}$ .

Hall-vakion itseisarvo lasketaan yhtälöllä 7. Nyt siis  $\frac{U_H}{I_p} = 0,74 \frac{V}{A}$ ,  $B = 0,0995 \text{ T}$  ja  $d = 0,001 \text{ m}$  sijoitetaan arvot yhtälöön 7:

$$R_H = 0,74 \frac{V}{A} \frac{0,001 \text{ m}}{0,0995 \text{ T}} \approx 0,007437 \frac{\text{m}^3}{C}. \quad (13)$$

Suoransovituksen yhtälöstä saatiin  $\frac{U_H}{I_p}$ :n virheeksi  $\delta(\frac{U_H}{I_p}) = 0,03 \frac{V}{A}$ . Magneettikentän virheen määrittelyyn käytän tietoa teslamittarin lukeman virheestä, joka on 2% lukemasta, joten

$$\delta B = 0,02 \cdot 0,0995 \text{ T} \approx 0,002 \text{ T}. \quad (14)$$

Virhe Hall-vakiolle saadaan tutulla virheen etenemilailalla yhtälöllä 10

$$\begin{aligned} \delta R_H &= \sqrt{\left(\frac{\partial R_H}{\partial(\frac{U_H}{I_p})} \delta\left(\frac{U_H}{I_p}\right)\right)^2 + \left(\frac{\partial R_H}{\partial B} \delta B\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{d}{B} \delta\left(\frac{U_H}{I_p}\right)\right)^2 + \left(\frac{U_H}{I_p} \frac{-d}{2B^2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0,001 \text{ m}}{0,0995 \text{ T}} 0,03 \frac{V}{A}\right)^2 + \left(0,74 \frac{V}{A} \frac{-0,001 \text{ m}}{2 \cdot 0,0995 \text{ T}}\right)^2} \approx 0,004 \frac{\text{m}^3}{C}. \end{aligned} \quad (15)$$

Saatiin siis tulokseksi

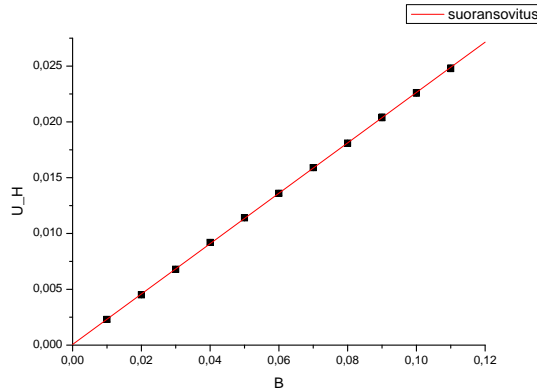
$$R_H = (0,007 \pm 0,004) \frac{\text{m}^3}{\text{C}}. \quad (16)$$

#### 4.1.2 $U_H(B)$ -mittaus

Sitten lasken Hall-vakion liitteen [1] toisen mittauksen tulosten avulla. Plottasin jälleen OriginPro 7.5:lla tulokset  $U_H(B)$ -kuvaajaksi (kuva 3). En pistänyt kuvaajaan ensimmäistä  $U_H-B$  -arvoparia, joka oli  $U_H = 0$  ja  $B = 0$ . Sovitin pisteiden kautta suoran, jonka painotin Hall-jännitteen virheillä. Hall-jännitteen virheen laskin samalla tavalla kuin luvussa 4.1.1, erona ainoastaan, että käytin jännitemittarissa mittausaluetta, joka kattoi neljä desimaalia jännitteen arvolle. Eli esimerkiksi ensimmäinen Hall-jännitteen arvon virheen laskin seuraavasti:

$$\delta U_H = (0,0001 + 0,005 * 0,0023) \text{ V} \approx 0,0002 \text{ V}. \quad (17)$$

Virheistä tuli kuitenkin niin pieniä, etteivät ne näy kuvaajassa.



Kuva 3: Hall-jännite magneettikentän funktiona ja sovitettu suora.

Sovitetun suoran kulmakertoimesta saadaan arvo termille  $\frac{U_H}{B}$ . OriginPro antoi kulmakertoimeksi  $\frac{\delta U_H}{\delta B} = (0,226 \pm 0,003) \frac{\text{V}}{\text{T}}$ . Toisessa mittauksessa pidin edelleen lämpötilan vakiona, nyt se siis oli  $T = 21^\circ\text{C}$ . Ohjausvirtakin oli vakio ja se oli mittauksen ajan arvossa  $I_p = 0,025 \text{ A}$ . Nämä arvot sijoittamalla yhtälöön 7 saadaan arvo Hall-vakiolle:

$$R_H = 0,226 \frac{\text{V}}{\text{T}} \frac{0,001 \text{ m}}{0,025 \text{ A}} = 0,00904 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}. \quad (18)$$

Kuvaajan kulmakertoimen virheeksi saatiin edellisen kappaleen mukaan  $\frac{U_H}{B} = 0,003 \frac{\text{V}}{\text{T}}$ . Hall-moduulin digitaalinäyttö näytti ohjausvirran arvon milliamppeerin tarkkuudella, arvioinkin virheeksi  $\delta I_p = 0,001 \text{ A}$  lukemasta. Nämä arvot syöttämällä yhtälöön 10 saadaan

arvo Hall-vakion virheelle:

$$\begin{aligned}
\delta R_H &= \sqrt{\left(\frac{\partial R_H}{\partial \left(\frac{U_H}{B}\right)} \delta\left(\frac{U_H}{B}\right)\right)^2 + \left(\frac{\partial R_H}{\partial I_p} \delta(I_p)\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{d}{I_p} \delta\left(\frac{U_H}{B}\right)\right)^2 + \left(\frac{U_H}{B} \frac{-d}{I_p^2} \delta I_p\right)^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{0,001 \text{ m}}{0,025 \text{ A}} 0,003 \frac{\text{V}}{\text{B}}\right)^2 + \left(0,226 \frac{\text{V}}{\text{B}} \frac{-0,001 \text{ m}}{(0,025 \text{ A})^2} 0,001 \text{ A}\right)^2} \\
&\approx 0,0004 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}
\end{aligned} \tag{19}$$

Hall-vakioksi saatiin siis

$$R_H = (0,0090 \pm 0,0004) \frac{\text{m}^3}{\text{C}}. \tag{20}$$

## 4.2 Varaustiheys

Varaustiheys määrittelee, kuinka monta alkeisvarausta on tilavuusyksikköä kohti. Se lasketaan yhtälöä 6 hieman muuttamalla:

$$R_H = \frac{1}{nq} \Rightarrow n = \frac{1}{R_H q}. \tag{21}$$

### 4.2.1 $U_H(I_p)$ -mittaus

Luvussa 4.1.1 saatiin  $U_H(I_p)$ -mittauksen avulla Hall-vakioksi  $R_H = 0,007 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$ . Varaus  $q$  on alkeisvaraus, joten merkitään  $q = 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . Nämä sijoittamalla yhtälöön 21 saadaan

$$n = \frac{1}{0,007 \frac{\text{m}^3}{\text{C}} 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \approx 8,9164 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{m}^3}. \tag{22}$$

Hall-vakion virhe on  $\delta R_H = 0,004 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$ , joten yhtälöllä 10 saadaan laskettua varaustiheyden virheeksi

$$\begin{aligned}
\delta n &= \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial R_H} \delta R_H\right)^2} = \frac{1}{2R_H^2 q} \delta R_H \\
&= \frac{1}{2\left(0,007 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}\right)^2 \cdot 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ C}} 0,004 \frac{\text{m}^3}{\text{C}} \\
&\approx 2,54755 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{m}^3}.
\end{aligned} \tag{23}$$

Varaustiheys on siis

$$n = (9 \cdot 10^{20} \pm 3 \cdot 10^{20}) \frac{1}{\text{m}^3}. \tag{24}$$

### 4.2.2 $U_H(B)$ -mittaus

Luvussa 4.1.2  $U_H(B)$ -kuvaajan avulla saatiin Hall-vakioksi  $R_H = 0,0090 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$ . Tämä ja alkeisvaraus sijoittamalla yhtälöön 21 saadaan laskettua varaustiheys

$$n = \frac{1}{0,0090 \frac{\text{m}^3}{\text{C}} 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \approx 6,9350 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{m}^3}. \quad (25)$$

Hall-vakion virhe oli tämän mittauksen avulla laskettuna  $\delta R_H = 0,0004 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$ . Saadaan siis yhtälän 10 avulla laskettua virhe

$$\begin{aligned} \delta n &= \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial R_H} \delta R_H\right)^2} = \frac{1}{2R_H^2 q} \delta R_H \\ &= \frac{1}{2\left(0,0090 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}\right)^2 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ C}} 0,0004 \frac{\text{m}^3}{\text{C}} \approx 1,5411 \cdot 10^{19} \frac{1}{\text{m}^3}. \end{aligned} \quad (26)$$

Varaustiheydeksi saadaan

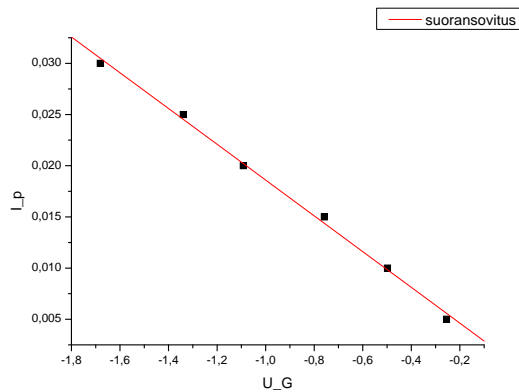
$$n = (6,9 \cdot 10^{20} \pm 0,2 \cdot 10^{20}) \frac{1}{\text{m}^3}. \quad (27)$$

### 4.3 Varausten liikkuvuus

Sijoitetaan johtavuuden yhtälö 8 varausten liikkuvuuden yhtälöön 9, nyt saadaan

$$\mu = \frac{l R_H}{R A} = \frac{I_p l R_H}{U_G A}, \quad (28)$$

missä  $U_G$  on jännite kiteen ohjausvirran suuntaisten päiden välissä. Liitteessä [1] olevasta 1. mittauksen tuloksista plottasin loppupään  $U_G$ :n ja  $I_p$ :n arvoista Originilla  $I_p(U_G)$ -kuvaajan. Kuvaajaan sovitettiin suora, jonka yhtälön kulmakerroin kertoo arvon termille



Kuva 4: Ohjausvirta Ge-levyn päiden välisen jännitteen funktiona ja suoransovitus.

$\frac{I_p}{U_G}$ . Tulokseksi tuli  $\frac{I_p}{U_G} = (-0,0175 \pm 0,0005) \frac{\text{A}}{\text{V}}$ . Taulukosta 1 saadaan arvot kiteen pituudelle  $l = 0,022 \text{ m}$  ja poikkipinta-alalle  $A = 10^{-5} \text{ m}^2$ . Hall-vakion arvoksi ensimmäisessä mittauksessa laskettiin  $R_H = 0,007 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$ . Sijoittamalla nämä arvot yhtälöön 28 saadaan

$$\mu = -0,0175 \frac{\text{A}}{\text{V}} \frac{0,022 \text{ m} 0,007 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}}{10^{-5} \text{ m}^2} \approx -0,2695 \frac{\text{m}^2}{\text{sV}}. \quad (29)$$



Tiedetään virheet  $\delta R_H = 0,004 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$  ja  $\delta(\frac{I_p}{U_G}) = 0,0005 \frac{\text{A}}{\text{V}}$ , kaavaa 10 käyttäen saadaan varausten liikkuvuudelle virhe

$$\delta\mu = \sqrt{\left(\frac{\partial\mu}{\partial(\frac{I_p}{U_G})}\delta\left(\frac{I_p}{U_G}\right)\right)^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial R_H}\delta R_H\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{lR_H}{A}\delta\left(\frac{I_p}{U_G}\right)\right)^2 + \left(\frac{I_p}{U_G}\frac{l}{A}\delta R_H\right)^2} \quad (30)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0,022 \text{ m}0,007 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}}{10^{-5} \text{ m}^2}0,0005 \frac{\text{A}}{\text{V}}\right)^2 + \left(-0,0175 \frac{\text{A}}{\text{V}}\frac{0,022 \text{ m}}{10^{-5} \text{ m}^2}0,004 \frac{\text{m}^3}{\text{C}}\right)^2} \quad (31)$$

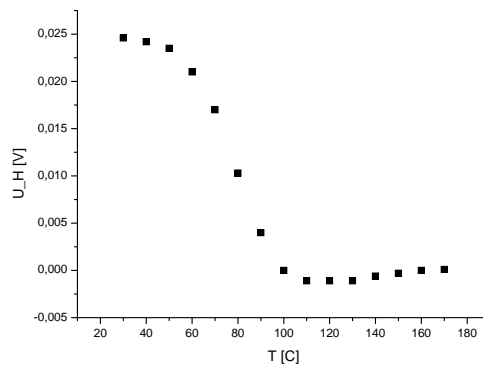
$$\approx 0,1542 \frac{\text{m}^2}{\text{sV}}. \quad (32)$$

Varausten liikkuvuus siis on

$$\mu = (-0,3 \pm 0,2) \frac{\text{m}^2}{\text{sV}}. \quad (33)$$

#### 4.4 Hall-jännite lämpötilan funktiona

Kolmannessa mittauksessa nostin ensin moduulin lämpötilan 170°C:een ja sen jälkeen lämmitys lakkasi ja lämpötila alkoi laskea. Otin jäähtymisen aikana 10 asteen välein lämpötila-Hall-jännite -arvopareja ylös ja tein OriginPro:lla niistä kuvaajan (kuva 5). Tämän mittauksen aikana magneettikentän oli tarkoitus pysyä vakiona, mutta se muuttui joitakin millitesloja lämmittäessä/jäähdyttäessä. Kuvaajasta voi päätellä, että mitä läm-



Kuva 5: Hall-jännite lämpötilan funktiona.

pimämpi Ge-levy on, sitä pienempi Hall-jännite on, eli varauksia kerääntyy sitä vähemmän Lorezin voiman vaikutuksesta Ge-levyn päihin. Ehkä lämpötila vaikuttaa Ge-kiteen permabiliteettiin siten, että permabiliteetti nousee, jolloin magneettikentän voimakkuus laskee, jos magneettikenttä pysyy vakiona. Tällöin magneettikenttä aiheuttaisi pienemmän voiman varauksiin ja näin syntyisi myös pienempi Hall-jännite.

## 5 Johtopäätökset

Hall-vakioksi sain ensimmäisen mittauksen tulosten avulla  $R_H = (7 \pm 0,4)10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$  ja toisen mittauksen tulosten avulla  $R_H = (9,0 \pm 0,4)10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$ . Teoreettinen arvo Hall-vakiolle p-tyypin kiteelle on taulukon 1 mukaisesti  $R_H = (4,17 \pm 0,08)10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$ . Laskemani arvot ovat

aivan liian suuria teoreettisiin arvoihin nähden. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että magneettikenttää mittaava anturi on herkkä pienillekin häiriöille. Esimerkiksi kännykkä tms. lähellä ollut magneettinen laite on saattanut vaikuttaa saamiini tuloksiin.

Hall-jännitettä mitatessa ilmeni, että magneettikentän arvo oli teslamittarin mukaan muuttunut lämpötilan muuttuessa. Lämmittäessä magneettikenttä pieneni ja jäähdyttyessä magneettikenttä nousi. Tämä on saattanut johtua mahdollisesta Hall-anturin lämpenemisestä, sillä se oli ihan lähellä lämmitettävää kidettä. Lämpötila ehkä muutti anturin sisällä olevien johteiden resistanssia ja laite näin laski magneettikentän arvoksi väärän tuloksen.

## 6 Liitteet

Liite 1. Mittauspöytäkirja

## Viitteet

[1] Young & Freedman. *University Physics*, 11<sup>th</sup> edition.