

# Slutrapport Fasta Tillståndets Fysik TIF096

## Grundämnesbestämning, GaAs optiska transmission och Halleffekten i dopat Germanium

Oscar Lindberg

mail: oscarlin@student.chalmers.se

Oscar Stommendal

mail: oscarsto@student.chalmers.se

2023-03-21

### Sammandrag

Med syftet att bestämma ett okänt kristallint grundämne, samt att mäta den optiska transmissionen för galliumarsenid (GaAs) har experiment med Deby-Scherrer-diffraktion respektive spektrometrarna Cary 5000 och Perkin Elmer 1725 genomförts. Dessutom har Halleffekten i en dopad germanium-kristall studerats. Experimenten innehåller olika aspekter av fasta tillståndets fysik, ett område inom materialvetenskap som är av stor betydelse för både industri och forskning. Det okända grundämnet var en FCC-struktur med gitterparametern  $a = 4,060 \pm 0,072 \text{ \AA}$ , vilket bedömdes vara aluminium. Det optiska transmissionsspektrat för GaAs uppvisade ett karakteristiskt utseende, med bland annat en skarp absorptionskant runt 880 nm (1,4 eV), motsvarande materialets direkta bandgap. I experimentet med Halleffekten erhölls för två olika kretskort med tillhörande Ge-kristaller värden som bland annat indikerar att den ena kristallen är n-dopad och den andra p-dopad. De mest betydande felkällorna skulle sannolikt kunna minimeras genom att använda alternativ utrustning för vissa delar av experimenten.

*Nyckelord:* *Debye-Scherrer-diffraktion, Halleffekt, optisk transmission, bandgap, dopning.*



# Innehåll

<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
<b>2 Teori</b>	<b>1</b>
2.1 Kristallstrukturer . . . . .	1
2.2 Debye-Scherrer-metoden och diffraktion . . . . .	2
2.3 Optisk transmission . . . . .	2
2.4 Halvledare . . . . .	2
2.4.1 Halleffekt . . . . .	3
<b>3 Metod</b>	<b>4</b>
3.1 Grundämnesbestämning och GaAs optiska transmission . . . . .	4
3.1.1 Feluppskattning av parametrar . . . . .	5
3.2 Halleffekt hos dopat Germanium . . . . .	5
3.2.1 Feluppskattning av parametrar . . . . .	6
<b>4 Resultat</b>	<b>6</b>
4.1 Grundämnesbestämning och GaAs optiska transmission . . . . .	6
4.2 Halleffekt hos dopat Germanium . . . . .	8
<b>5 Diskussion</b>	<b>8</b>
5.1 Grundämnesbestämning och GaAs optiska transmission . . . . .	8
5.2 Halleffekt hos dopat Germanium . . . . .	9
<b>6 Slutsatser</b>	<b>10</b>
<b>Referenser</b>	<b>10</b>
<b>A Tillåtna reflexer</b>	<b>12</b>
<b>B Övriga resultat</b>	<b>12</b>
B.1 Grundämnesbestämning och GaAs optiska transmission . . . . .	12
<b>C Övriga figurer</b>	<b>13</b>
C.1 Grundämnesbestämning och GaAs optiska transmission . . . . .	13
C.2 Halleffekt i dopat Germanium . . . . .	16
<b>D PYTHON-kod</b>	<b>16</b>
<b>E Labblogg</b>	<b>21</b>

# 1 Inledning

Materialvetenskap har varit föremål för forskning under en lång tid och nya, avancerade material utvecklas fortfarande idag. Denna utveckling är avgörande inte bara för materialvetenskapen utan också för andra forskningsområden och samhället i stort. Det möjliggör framsteg inom viktiga områden som energiproduktion och elektronik. I denna studien behandlas flera centrala delar av materialvetenskap, såsom kristallstrukturer, diffraktion, optisk transmission och halvledare.

Syftet med laborationen är dels att använda Debye-Scherrer-diffraktion för att bestämma ett okänt (kristallint) grundämne, samt att bestämma och tolka den optiska transmissio nen i ett givet område för galliumarsenid (GaAs); dels att studera Halleffekten i en dopad germanium (Ge)-kristall, och därmed bestämma Hallkoefficienten och dra slutsatser om halvledarens egenskaper.

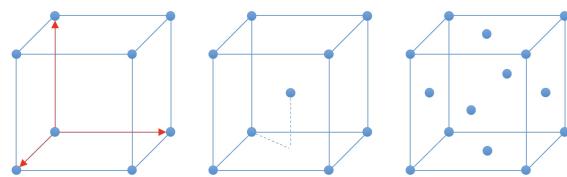
## 2 Teori

I detta avsnitt förklaras de grundläggande koncept och principer som är relevanta för experimenten. Framförallt diskuteras fasta tillståndets fysik och några särskilda delområden, bland annat kristallstrukturer och halvledare.

### 2.1 Kristallstrukturer

En kristallstruktur är en regelbunden, periodisk anordning av atomer, molekyler eller joner i ett kristallint fast material. Kristallstrukturer är uppbyggda av gitterpunkter som definierar den periodiska anordningen av materialet. För att studera olika materialstrukturer på ett systematiskt sätt kan gittret skalias ned till en enda enhetscell, som innehåller en delmängd av gitterpunktarna. Genom att bygga flera enhetsceller på varandra kan hela gitterstrukturen återskapas [1].

Gitterpunktarna är ordnade på ett sätt som återspeglar materialets symmetri. Denna symmetri kan beskrivas genom att använda gittervektorer, det vill säga vektorer som pekar från en gitterpunkt till en annan. Tillsammans med enhetscellen kan gittervektorerna användas för att beskriva hela kristallstrukturen. I denna rapport antas vi arbeta med kubiska strukturer. Detta förenklar utförandet och de nödvändiga beräkningarna för att bestämma det okända grundämnet. I figur 1 visas enhetscellerna för de tre enklaste kubiska strukturerna; "simple cubic", "body centered cubic" och "face centered cubic". För att beskriva plan och riktningar i ett gitter används Miller-index, vilka brukar skrivas på formen  $(hkl)$ . Ett exempel på Miller-index är  $(100)$  som beskriver ett plan som är parallell med gittervektorn i riktningen  $[1\ 0\ 0]$  [1].



Figur 1: Från vänster till höger, utseende och gitterpunkter för enhetscellen hos "simple cubic" (SC), "base centered cubic" (BCC) och "face centered cubic" (FCC). De röda pilarna motsvarar gittervektorerna för SC.

## 2.2 Debye-Scherrer-metoden och diffraktion

För att bestämma ett okänt kristallint grundämne kan Debye-Scherrer-diffraktion utnyttjas. Denna teknik utvecklades av Peter Debye och Paul Scherrer under 1910-talet och har sedan dess varit en av standardmetoderna för att bestämma strukturen för ett material [2]. Metoden grundar sig på Braggs lag,

$$2 \cdot d \cdot \sin(\theta) = n \cdot \lambda, \quad (1)$$

som relaterar vinkeln  $\theta$  för diffraktion till våglängden  $\lambda$  för den inkommande strålningen [3]. Här är  $n$  ett heltal och  $d$  en materialberoende parameter som för ämnen med kubiska gitter definieras som

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + \ell^2}}, \quad (2)$$

där  $a$  är gitterkonstanten och  $(hkl)$  Miller-index. Mer specifikt så beskriver  $d$  avståndet mellan två närliggande plan innehållande gitterpunkter i ett ämne [3]. För de tre olika strukturerna som beskrevs i avsnitt 2.1 gäller att endast vissa Miller-index (riktningar i gittret) ger upphov till diffraktion. Detta kan matematiskt härledas genom den så kallade strukturfaktorn [3]. En översikt av Miller-index motsvarande tillåtna reflexer hos SC, BCC respektive FCC ges i bilaga A.

## 2.3 Optisk transmission

För att mäta den optiska transmissionen kan en spektrometer användas. Cary 5000 [4] är en spektrometer som mäter transmissionen på våglängdsintervallet 175 – 3300 nm. Principen bakom Cary 5000 är i korthet att strålning inkommer från en strålningskälla, grov-filtreras och leds in i en monokromator, som delar upp strålningen i dess olika våglängder. Strålningen leds därefter genom ett prov och detekteras av en detektor som mäter dess intensitet. Monokromatorn sveper över olika frekvenser och ett transmissionsspektrum erhålls. Samtidigt genomförs referensmätningar.

En annan spektrometer, som arbetar upp till betydligt längre våglängder, 1390 – 27 000 nm, är Perkin Elmer 1725 [5]. Denna spektrometer mäter på alla våglängder samtidigt och använder en strålningskälla som skickar strålning genom en Michelson-interferometer. En Michelson-interferometer delar upp inkommande strålning i två separata strålar. Skillnader i optisk väg mellan de två strålarna leder till en fasförskjutning. Vid sammanstrålning uppstår således ett interferensmönster med sinusformad intensitetsfördelning, vars karakteristik beror av vågförslängningen. Perkin Elmer-spektrometern mäter Fouriertransformen av strålningen, och signalen från detektorn kan betraktas som en integral av intensiteten över våglängden.

## 2.4 Halvledare

Halvledare, vilka ska studeras i experimentets andra del, är mycket viktiga material som hittas i grundläggande elektriska komponenter som transistorer och dioder [6]. Kortfattat är en halvledare ett material vars elektriska egenskaper ligger mellan isolatorers och ledares. Vanliga halvledare är bland att de fyrvärda (oxidationstal IV) ämnena germanium och kisel, där denna studie ska fokusera på germanium. För jämförelse ligger ledningsförmågan hos en halvledare ofta mellan  $10^{-6} – 10^3$   $(\Omega\text{m})^{-1}$ , medan ledare har denna runt  $10^8$   $(\Omega\text{m})^{-1}$  och goda isolatorer  $10^{-10}$   $(\Omega\text{m})^{-1}$  [6].

Halvledare och isolatorer skiljer sig båda från ledare genom att deras valenselektroner helt fyller ett av energibanden (täta energinivåer som elektronerna i ett ämne bildar), valensbandet. Detta leder till ett slags hål i elektronernas energidiagram, det så kallade bandgapet. I detta energintervall finns inga tillstånd hos isolatorer och halvledare (se figur 9 i appendix C) [1], [6]. Storleken på bandgapet bestämmer i hög grad ett ämnes elektriska, men även optiska egenskaper som diskuterades tidigare. Halvledare har typiskt bandgap  $E_g < 3$  eV [1].

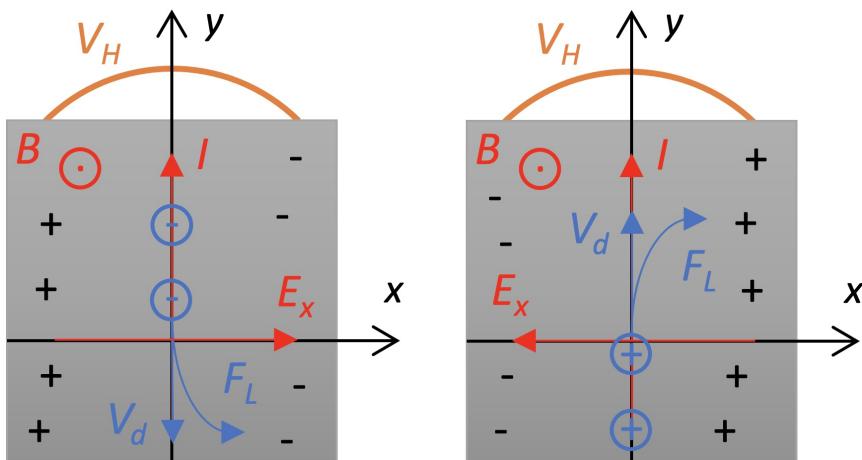
Skillnaden i ledningsförmågan mellan ledare och halvledare beror främst på färre fria laddningsbärare i halvledaren [6]. När temperaturen ökar kan vissa elektroner i halvledare å andra sidan nå tillräckligt hög energi för att exciteras över bandgapet till ledningsbandet, vilket förbättrar ledningsförmågan.

Inom gruppen halvledare finns det också olika typer. I denna studie kommer en dopad halvledare att studeras, men det finns också odopade, så kallade intrinsiska halvledare. I en dopad halvledare har (ofta) en liten del av ett atomslag i halvledaren bytts ut mot ett annat atomslag. Detta kan leda till så kallad n- eller p-doping, beroende på om de dominerande laddningsbärarna efter dopingen är elektroner eller hål. Ett hål är en typ av positiv laddningsbärare som uppstår av vakanser (brist på elektroner) i valensbandet.

Vid n-doping byts en del atomer ut mot ett atomslag med fler valenselektroner. Detta ger ett överskott av elektroner, vilka kan leda ström. Analogt tillsätts ett atomslag med färre valenselektroner vid p-doping, vilket skapar hål som agerar laddningsbärare. En del av studien ämnar till att avgöra om den studerade halvledaren är n- eller p-dopad, se avsnittet nedan.

#### 2.4.1 Halleffekt

Halleffekt är ett fenomen som uppstår i tunna prov av metall- eller halvledarmaterial. När ett magnetfält skickas rakt upp genom plattan ( $z$ -riktning) samtidigt som en ström skickas genom densamma ( $y$ -riktning) uppstår en spänning (elektriskt fält) över plattan (i  $x$ -led). Se figur 2 nedan.



Figur 2: Illustration över Halleffekten i en halvledare. En spänning, Hallspänningen, uppstår tvärs över plattan beroende på att laddningsbärarna (i figuren visas fallet med elektroner till vänster och hål till höger) ”trycks” ut mot kanterna på grund av Lorentzkraften  $F_L$  från magnetfältet. Hallspänningen kan teoretiskt beräknas genom att balansera denna kraft med kraften från det elektriska fältet  $E_x$ .

Beroende på om materialet domineras av elektroner eller hål som laddningsbärare kommer tecknet på spänningen variera då den magnetiska kraften trycker elektroner (eller hål) så att en negativ (eller positiv) spänningsskillnad uppstår. Spänningen, den så kallade Hallspänningen, kan matematiskt beräknas genom att balansera Lorentzkraften med kraften från det elektriska fältet enligt

$$V_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}, \quad (3)$$

där  $R_H$  är Hallkoeffienten,  $B$  magnetfältets storlek,  $I$  strömmens storlek och  $d$  plattans tjocklek [1]. Hallkoeffienten kan i de flesta fall approximeras som  $R_H = 1/(q \cdot N)$ , där  $q$  är elementarladdningen (positiv för hål, negativ för elektroner) och  $N$  antalet laddningsbärare per volymsenhet. Halleffekten används bland annat till att hitta laddningsbärarnas mobilitet, vilket är en viktig materialegenskap som är svårt att mäta på annat sätt [6].

### 3 Metod

I detta avsnitt beskrivs metoderna och försöksuppsättningarna vilka användes för att bestämma ett okänt grundämne, studera optisk transmission och Halleffekten i dopad germanium.

#### 3.1 Grundämnesbestämning och GaAs optiska transmission

För att bestämma det okända grundämetet användes en Debye-Scherrer-kamera, se figur 10 och 11 i bilaga C [3]. Denna består kortfattat av en högspänningsgenerator och fyra provbehållare. I provbehållaren sattes en optisk film, som kan detektera den avgivna strålningen. Provet monterades också i denna enligt anvisning, se återigen figur 11. Det var viktigt att få provet i pulverform då detta innebär att det för varje kristallplan finns korn vars orientering gör diffraction möjlig [3]. Detta gjordes genom att fila ned provet i provrören för att sedan placera detta i provbehållaren.

När en mätning genomförts framkallades diffractionsmönstret genom att filmen placeras i en ljustät behållare (se figur 12 i bilaga C). Sedan hälldes en framkallningsvätska i behållaren, vilken tömdes efter 10 min 30 s. Samma sak gjordes under 5 min med en fixeringsvätska. Efter framkallningen mättes alla synliga cirkelars diameter  $d$  som korresponderar mot samma diffrafterade strålar [3] (se återigen figur 10 men också figur 7). Sedan kunde  $\theta$  erhållas i radianer genom  $r = d/2 = 2\theta \cdot R$ , där  $R$  är kamerans radie, i detta fall  $R = 28,65$  mm (se figur 10). Sedan skrevs Braggs lag om (med  $n = 1$ ) enligt

$$2 \cdot \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + \ell^2}} \cdot \sin(\theta) = n \cdot \lambda \iff \frac{\sin^2(\theta)}{h^2 + k^2 + \ell^2} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot a^2} = C \quad (4)$$

där  $C$  är en konstant. För de olika värdena på  $\theta$  som erhölls efter en mätning utfördes divisionen med möjliga kombinationer av Miller-index hos SC, BCC och FCC i stigande ordning. För den struktur som denna division gav ett konstant svar för, användes sedan Braggs lag i sitt grundutförande för att bestämma gitterparametern  $a$ . Värdet på denna tillsammans med strukturen gjorde det sedan möjligt att bestämma ämetet från tabellvärden.

Efter exponering innehåller filmen två uppsättningar cirklar, en vid strålningens ingångshål och en vid utgångshålet. Det kan vara svårt att avgöra vilket av dessa som är utgångshålets uppsättning (framåtspridda strålar). I detta fall beräknades kvoten ovan för

båda uppsättningarna och eftersom endast en av dessa gav en given struktur antogs den vara de framåtspridda strålarnas diffraktionsmönster. För en extra försäkran om att kunna bestämma det okända ämnet vägdes också en viss mängd av detta på en våg av god noggrannhet (märke VWR). Dessutom uppskattades volymen av provet med hjälp av en enkel linjal varpå densiteten beräknades för vidare jämförelse.

För att mäta den optiska transmissionen för GaAs, monterades ett prov i interferometerns mätfack. Mätningar genomfördes med Cary 5000 och Perkin Elmer 1725 med hjälp av tillhörande programvara. Våglängdsintervallet som skulle undersökas var 185 – 25 000 nm, vilket innebär att Cary 5000 med fördel användes i intervallet 185 – 3300 nm och Perkin Elmer 1725 i 1390 – 25 000 nm. Mätdatan sparades för vidare analys och transmissionsspektra, med transmittansen som funktion av våglängden, konstruerades i PYTHON.

### 3.1.1 Feluppskattning av parametrar

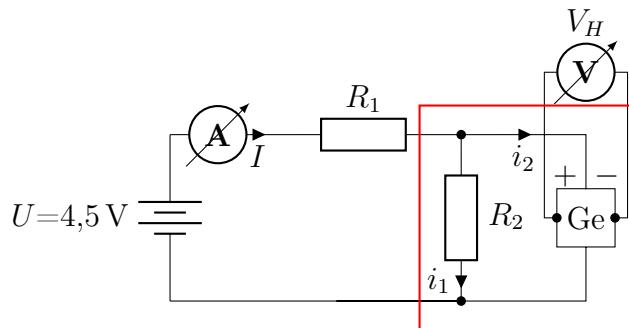
För att feluppskatta, framförallt värdet på gitterparametern  $a$ , användes felfortplantningsformeln

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (5)$$

på Braggs lag (ekvation 1). Genom att sätta  $a = y$  i ekvationen ovan och sedan de övriga parametrarna i ekvationen med fel som  $x_i$  kunde ett fel på  $a$  beräknas. Denna användes också analogt för att göra en feluppskattning kring densiteten på ämnet.

## 3.2 Halleffekt hos dopat Germanium

För att studera Halleffekten i germanium användes två färdiga kretskort med monterade Ge-kristaller (nummer 4 och 5, märke okänt). Kretskortet innehöll också en trimpotentiometer. Innan en mätning påbörjades kopplades kretsen i figur 3 upp. Som spänningsskälla användes ett batteri med  $U = 4,5$  V och  $R_1$  i kretsen markerar en 10-varvs potentiometer (Labpot typ H10) som användes för att variera strömmen i kretsen. För att mäta Hallspänningen  $V_H$  och strömmen  $I$  användes digitala multimeter (Keysight 34461A). Observera att spänningen mättes så att denna blev positiv för positiva laddningsbärare, i enlighet med teorin. I figuren markerar den röda rektangeln kretskortet med potentiotometern ( $R_2$ ) och Ge-kristallen. Se figur 14 i bilaga C.2 för att se hur denna koppling såg ut i praktiken.



Figur 3: Kopplingsschemat som användes för att mäta Halleffekten i dopade Ge-kristaller. Den röda rektangeln illustrerar kretskortet som innehöll en vridpotentionmeter ( $R_2$ ) och Germanium-plattan. Observera att detta kretskort fördes in i ett magnetfält, vilket inte syns i kopplingsschemat.

Innan en mätning påbörjades skulle spänningen  $V_H$  vara så nära 0 som möjligt (utan magnetfält). Detta för att kompensera eventuell asymmetri i kristallens form och kontaktiering [8]. Detta gjordes med  $R_1 = 500 \Omega$ . Värdet på  $R_2$  är ointressant men faktumet att den finns gör att i princip all ström kommer att passera genom kristallen ( $i_2 = I, i_1 = 0$ ) då denna har försumbar resistans jämfört med  $R_2$ . Mätningar utfördes sedan på respektive kretskort genom att föra in dem i permanentmagnetens fält och anteckna värden på  $I$  och  $V_H$  för varje  $500 \Omega$  upp till  $10 \text{ k}\Omega$ .

Enligt teoriavsnittet kan vi erhålla Hallkoeffienten med hjälp av ekvation 3. Med hjälp av denna ekvation gjordes för varje kretskort en linjär regression,  $y = kx + m$ , i PYTHON. Här sattes  $k = \frac{R_H \cdot B}{d}$  ( $m$ -värdet ska i teorin vara 0).  $R_H$  beräknades sedan från  $k$ -värdet för varje kretskort och sedan kunde också respektive laddningsbärartäthet  $N$  beräknas enligt teorin ( $R_H = 1/(e \cdot N)$ ). En feluppskattning gjordes till sist enligt nedan.

### 3.2.1 Feluppskattning av parametrar

En feluppskattning gjordes med användning av två olika metoder. För att få en uppfattning om felet för värdet på  $k$  skrevs ett PYTHON-script (se appendix D). För att feluppskatta  $k$  krävdes en uppskattning av felen på  $V_H$  och  $I$ , vilka med grund i hur värdena varierade på multimeterarna då ett värde erhölls antogs vara normalfördelade med  $\sigma = 0,2 \text{ mV}$  respektive  $\sigma = 0,2 \text{ mA}$ . Enligt [7] ska multimeterarnas egna felmarginer vara försumbara i jämförelse med detta. I PYTHON-scriptet användes sedan en **for**-loop för att beräkna värdet på  $k$  genom linjär regression, där det för varje iteration adderades ett tal inom den antagna felmarginen ovan samtidigt som ett  $k$ -värde beräknades och sparades i en lista. Efter **for**-loopen beräknades sedan standardavvikelsen på  $k$ , vilket sedan användes som spridningsmått på  $k$ . Detta gjordes även för  $m$ -värdet i regressionen. För att slutligen beräkna felet på  $R_H$  användes felfortplantningsformeln (5) på ekvationen  $R_H = k \cdot d/B$ . Här är  $y = R_H$ ,  $f$  är funktionen som används för att beräkna  $R_H$ , det vill säga ekvationen och  $\Delta x_i$  felet för  $k$  och  $d$  i detta fall, då magnetfältets styrka  $B$  inte hade någon känd felmargin.

## 4 Resultat

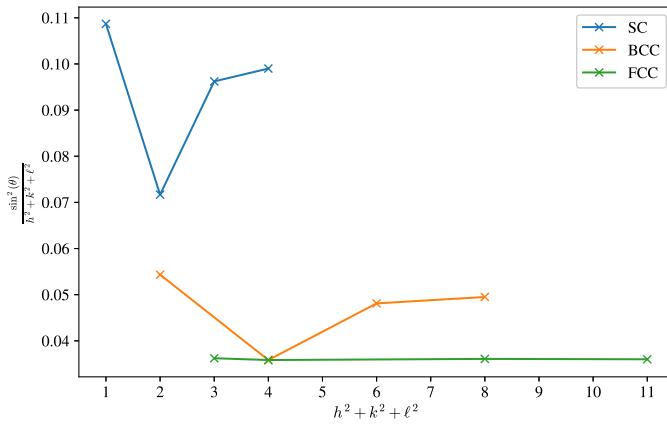
I detta avsnitt presenteras resultaten för de två olika delarna i studien i form av text, tabeller och figurer med korta kommentarer.

### 4.1 Grundämnesbestämning och GaAs optiska transmission

Två filmer med tecken på diffraction framkallades under två separata försök, där det sista av dessa gav bäst och tydligast tecken på diffraction hos det okända ämnet. Fyra stycken ringar var tydligt synliga från framåtspridna strålar och värdena på  $r$  hos dessa visas i tabell 1 nedan. Våglängden för röntgenstrålningen var given som  $\lambda = 1,5413 \text{ \AA}$ , med en okänd felmargin. Värdena på  $(h^2 + k^2 + \ell^2)$  erhölls enligt teorin som SC:  $\{1, 2, 3, 4\}$ , BCC:  $\{2, 4, 6, 8\}$  och FCC:  $\{3, 4, 8, 11\}$ . I figuren nedan visas kvoten  $\sin^2(\theta)/(h^2 + k^2 + \ell^2)$  för dessa värden på  $\theta$  och tillåtna  $(hkl)$  för SC, BCC och FCC (insatta i stigande ordning). Gitterparametern  $a$  bestämdes från detta som ett medelvärde för de fyra olika värdena på  $r$  och  $\theta$  till  $a = 4,060 \pm 0,072 \text{ \AA}$  (se tabell 4 i bilaga B). Vikten på den mängd prov som vägdes blev  $m = 0,7 \pm 0,001 \text{ g}$ . Volymen uppskattades till  $V = 0,2 \pm 0,1 \text{ cm}^3$  vilket skulle ge en densitet på  $\rho = m/V = 3,5 \pm 1,8 \text{ g cm}^{-3}$ .

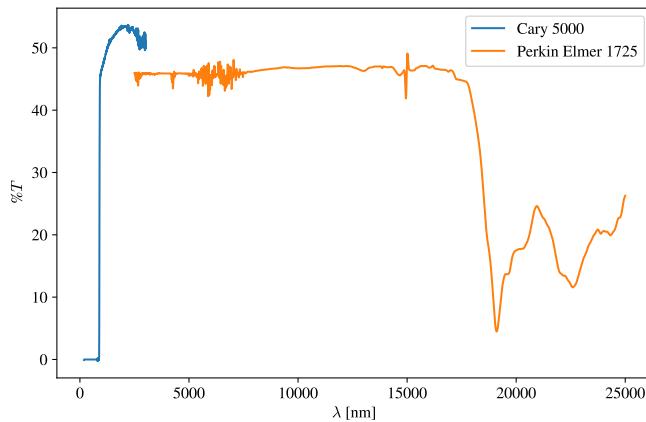
Tabell 1: Värden på kvoten  $\sin^2(\theta)/(h^2 + k^2 + \ell^2)$  för varje värde på  $r$  och tillåtna  $(hkl)$  för SC, BCC respektive FCC. Dessa värden motsvarar graferna i figur 4.

$r$ (cm)	$\theta$ (rad)	$\sin^2(\theta)$	Kvot SC	Kvot BCC	Kvot FCC
1,925	$0,3359 \pm 0,0087$	0,1090	0,1090	0,0543	0,0362
2,225	$0,3883 \pm 0,0087$	0,1433	0,0717	0,0358	0,0358
3,250	$0,5672 \pm 0,0087$	0,2887	0,0962	0,0481	0,0361
3,900	$0,6806 \pm 0,0087$	0,3960	0,0990	0,0495	0,0356



Figur 4: Kvoten  $\sin^2(\theta)/(h^2 + k^2 + \ell^2)$  plottad för uppmätta värden på  $\theta$  och de godkända kombinationerna av  $(hkl)$  för SC, BCC och FCC (se bilaga A).

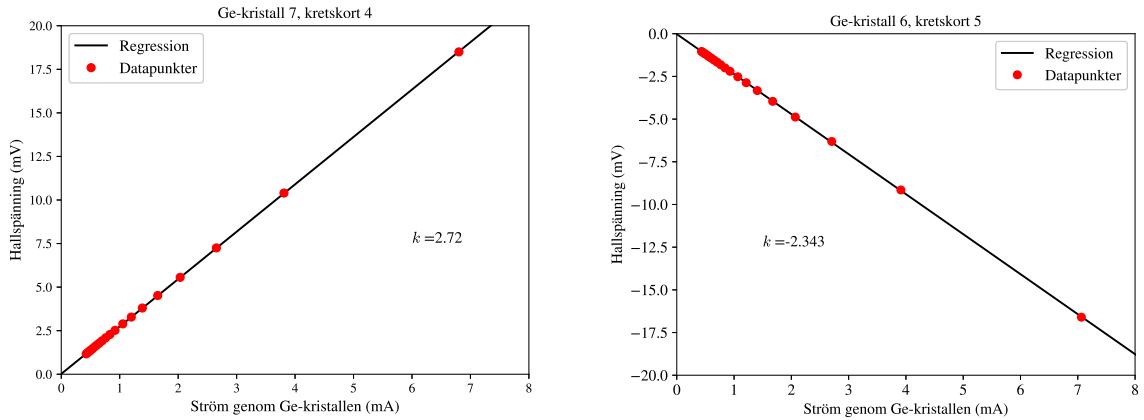
Det optiska transmissionsspektrat för GaAs presenteras i figur 5. I figuren visas en mätning med Cary 5000 i intervallet 185 – 3000 nm och en mätning med Perkin Elmer 1725 i intervallet 2500 – 25 000 nm. Sammantaget täcks 185 – 25 000 nm, motsvarande 6,70 – 0,05 eV. En förstoring av de särskilt intressanta områdena 850 – 950 nm (Cary 5000) och 17250 – 25 000 nm (Perkin Elmer 1725) visas i figur 8 i bilaga B.



Figur 5: Uppmätt transmissionsspektrum för GaAs i intervallet 185 – 25 000 nm (6,70 – 0,05 eV). Den blåa grafen t.v. visar en mätning med Cary 5000 och den orangea grafen t.h. en mätning med Perkin Elmer 1725.

## 4.2 Halleffekt hos dopat Germanium

Den uppmätta Hallspänningen som funktion av strömmen genom Ge-kristallerna 7 (kretskort 4) och 6 (kretskort 5) visas i figur 6. Linjärregression ger riktningskoefficienterna  $k_4 = 2,343 \pm 0,072 \text{ V A}^{-1}$  och  $k_5 = 2,720 \pm 0,084 \text{ V A}^{-1}$ , och konstanttermerna  $m_4 = 0,022 \pm 0,152 \text{ mV}$  och  $m_5 = 0,019 \pm 0,174 \text{ mV}$ . Det pålagda magnetfältets storlek var  $B = 0,135 \text{ T}$  och plattans tjocklek  $d = 0,0005 \text{ m}$ . De erhållna värdena på  $R_H$ ,  $n$  och  $p$  för kretskort 4 och 5 presenteras i tabell 2.



Figur 6: Regressionslinjer för mätpunkterna som erhölls då Halleffekten mättes i kretskort 4 (undre) och kretskort 5 (övre). På  $x$ -axeln visas strömmen genom kristallen och på  $y$ -axeln uppmätt Hallspänning.

Tabell 2: Värdena på  $R_H$ ,  $n$  och  $p$  som erhölls från experimenten med Halleffekt.

Kretskort	$R_H$ ( $\text{m}^3 \text{C}^{-1}$ )	$n$ ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ )	$p$ ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ )
4	$-0,009 \pm 0,002$	$6,935 \pm 1,541$	—
5	$0,010 \pm 0,002$	—	$6,242 \pm 1,248$

## 5 Diskussion

I detta avsnitt diskuteras resultaten för bestämningen av det okända grundämnnet, GaAs optiska transmission och Halleffekten hos dopat Germanium.

### 5.1 Grundämnnesbestämning och GaAs optiska transmission

Det okända grundämnets struktur är sannolikt FCC, vilket framgår av figur 4 nedan, där kvoten  $\sin^2(\theta)/(h^2 + k^2 + \ell^2)$  som funktion av den kvadrerade summan av de möjliga kombinationerna av  $(hkl)$  är närmast konstant. Värdet på gitterparametern var  $a = 4,060 \pm 0,072 \text{ Å}$ . Från detta faller grundämnena aluminium (Al,  $a = 4,048 \text{ Å}$ ) och silver (Ag,  $a = 4,08 \text{ Å}$ ) ut som möjliga kandidater för det okända ämnet [9]. Aluminiums gitterparameter ligger närmare det uppmätta värdet än silvers dito, men båda tabellvärdena ligger inom felsmarginalen.

Det okända ämnets densitet uppskattades till  $\rho = 3,5 \pm 1,8 \text{ g cm}^{-3}$ . Densiteten av aluminium och silver är  $\rho_{Al} = 2,7 \text{ g cm}^{-3}$  respektive  $\rho_{Ag} = 10,5 \text{ g cm}^{-3}$ , vilket innebär att silvers densitet ligger utanför den uppmätta densitetens (grovtt uppskattade) felsmarginal. Detta pekar mot att det okända ämnet är aluminium. Ytterligare stöd för slutsatsen fås av det faktum att materialet upplevdes hårdare än silver.

En fysikalisk felkälla som sannolikt kan bidra till en viss osäkerhet i den uppmätta gitterparametern är Cu K $\alpha$ -strålningen som består av två våglängder. Det är möjligt att kombinationen av de två komponenterna bidrar till att konturerna på de framkallade ringarna blir bredare än vad som önskas, vilket bidrar till osäkerheter i den uppmätta diametern. Troligtvis kan även fästanordningarnas stabilitet i kamerorna (särskilt filmens och provets stabilitet) ha en viss inverkan på ringarnas bredd och form.

Det optiska transmissionsspektrat för GaAs i figur 5 visar att materialets transmittans är kraftigt våglängdsberoende i det undersökta intervallet. GaAs har en skarp absorptionskant runt 880 nm (1,4 eV), vilket motsvarar materialets direkta bandgap. Materialet absorberar alltså ljus med våglängder under cirka 880 nm och transmitterar ljus med längre vågländer — vilket framgår särskilt tydligt i figur 8 (till vänster) i bilaga B. Vid våglängder mellan cirka 900 nm och 18 000 nm är materialet mycket transparent. I området över 18 000 nm minskar transmittansen och grafen får ett mer komplext utseende. Det är möjligt att beteendet uppkommer som följd av materialets gittervibrationer.

Vid gränsen där mätningen med Cary 5000 övergår i mätningen med Perkin Elmer 1725 syns en diskontinuitet om några procentenheter. Det är möjligt att de uppmätta värdena i detta gränsområde är särskilt osäkra just på grund av de ligger i utkanten av respektive mätning. För mätningen med Cary 5000 observerades vid några mätningar särskilt stora osäkerheter runt detta gränsområde. Det är också möjligt att diskontinuiteten kan förklaras av att spektrometrarna här gör olika bakgrundsuppskattningar. För att öka säkerheten inför framtida experiment kan det vara en god idé att använda instrument som möjliggör bredare överlappningar.

## 5.2 Halleffekt hos dopat Germanium

Hallkoefficienten beräknades till  $R_H = -0,009 \pm 0,002 \text{ m}^3 \text{ C}^{-1}$  för kretskort 4 och  $R_H = 0,010 \pm 0,002 \text{ m}^3 \text{ C}^{-1}$  för kretskort 5. Koefficienternas tecken indikerar att kretskort 4 sannolikt bär en n-dopad Ge-kristall och kretskort 5 en p-dopad Ge-kristall, vilket också framgår av tabell 2. Det noteras att laddningsbärartätheterna,  $n = (6,935 \pm 1,541) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$  respektive  $p = (6,242 \pm 1,248) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , är av samma magnitud och relativt lika till beloppet. Detsamma gäller Hallkoefficienternas absolutbelopp. Det är möjligt att kretskorten som analyserades är n- respektive p-dopade i likartad grad, även om resultaten från experimentet inte indikerar en exakt överensstämmelse.

En aspekt som är intressant att notera är  $m$ -värdet på regressionslinjerna. Detta ska som metoden nämnde vara 0 enligt teorin. Dessa bestämdes för respektive kretskort till  $m_4 = 0,022 \pm 0,152 \text{ mV}$  och  $m_5 = 0,019 \pm 0,174 \text{ mV}$ . Således pekar dessa värden på en relativt pålitligt resultat och bra genomfört experiment, då de jämfört med Hall-spänningen är mycket små. Att de inte hamnar närmare 0 beror sannolikt på de felkällor som kan ha påverkat experimentet, se nedan.

En möjlig felkälla i experimentet kring Halleffekten var svårigheten att uppnå spänningen  $V_{start} = 0$  V innan mätserierna påbörjades. Potentiometrarnas grova justeringssteg gjorde att de initiala spänningarna blev  $V_{start} = -0,659$  mV för kretskort 4 och  $V_H^0 = -4,38$  mV för kretskort 5. Detta kan ha bidragit till en förskjutning i de mätvärden som togs i respektive mätserie, och möjligtvis påverkat slutresultaten. Det kan också, i enlighet med teorin, göra att asymmetri i kristallen och kontaktieringen ej kompenseras, vilket också kan ha påverkat resultaten.

## 6 Slutsatser

Syftet med laborationen var tvådelat, där ena delen ämnade till att ta reda på ett okänt grundämne med hjälp av Debye-Scherrer-diffraktion. I den andra delen studerades halvledare, här var syftet att dels bestämma transmissionsspektrat för GaAs, och dels studerades Hall-effekten i en dopad germanium-kristall. Syftet anses uppfyllt med rum för ytterligare undersökningar enligt följande slutsatser:

1. Det okända ämnet bedöms vara aluminium. Eftersom ingen entydig slutsats nåddes enbart med Debye-Scherrer-metoden, var det motiverat med en enklare densitetsuppskattning som sannolikt utesluter den andra kandidaten (silver).
2. Transmissionsspektrat för GaAs visade på tydligt våglängds(energi)-beroende hos transmissionen. Spektrats form stämde också med teoretiska förutsägelser, såsom bandgap och gittervibrationer i ämnet. En viss diskontinuitet i grafen påvisades, vilken kan bero på att instrumenten utförde olika typer av bakgrundsmätningar, alternativt att instrumentens felsmarginal var större i dessa gränsområden för de möjliga mätintervallen. Denna diskontinuitet har dock ingen inverkan på de fysikaliska fenomenen som grafen påvisar.
3. Värdena som erhölls på Hall-koefficienten för de Ge-kristaller som undersöktes ansågs vara rimliga. Detta stärktes också då laddningsbärartätheterna beräknades, vilka var av rimlig storleksordning sett till andra ämnens tätheter. En möjlig felkälla vid försöken var att spänningen innan mätserier togs inte var exakt 0. Detta kan ha orsakat en förskjutning i mätvärdena och således också ett fel på de storheter som sedan beräknades.

För att förbättra resultaten i framtida studier bör utrustningen för Debye-Scherrer diffraktionen ses över. Framförallt fästanordningen för provet borde förstärkas för att ge tydligare resultat. Vidare kan om möjligt transmissionsspektrat tas fram med ett enda instrument. Detta gör att bakgrundsmätningen blir samma under hela mätningen vilket gör mätningen kontinuerlig. För Halleffekten bör potentiometrarnas känslighet ökas för att kunna erhålla en initialspänning som är så nära 0 som möjligt. Detta för att minimera risken för mätfel i enlighet med teorin.

## Referenser

- [1] P. Hofmann, *Solid State Physics: An introduction*. 3. uppl., Weinheim, Tyskland: Wiley-VCH, 2022.
- [2] E. Mueller, “The Debye–Scherrer technique – rapid detection for applications,” Open Physics, 20: s. 888–890, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0193>

- [3] R. Ryberg, “Strukturbestämning med röntgen,” Chalmers Tekniska Högskola och Göteborgs Universitet, Göteborg, Sverige, 1993. Tillgänglig: <https://chalmers.instructure.com/courses/22586/files/folder/Referenslitteratur?preview=2555427>, hämtad: 2023-03-06.
- [4] Agilent, “Cary 4000/5000/6000i Series UV-Vis-NIR Spectrophotometers Brochure”. Tillgänglig: [https://www.agilent.com/cs/library/brochures/5990-7786EN\\_Cary-4000-5000-6000i-UV-Vis-NIR\\_Brochure.pdf](https://www.agilent.com/cs/library/brochures/5990-7786EN_Cary-4000-5000-6000i-UV-Vis-NIR_Brochure.pdf), hämtad: 2023-03-28.
- [5] PerkinElmer, “PerkinElmer Frontier FT-IR, NIR and FIR Spectroscopy Brochure”. Tillgänglig: [https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/bro\\_frontierftir.pdf](https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/bro_frontierftir.pdf), hämtad: 2023-03-20.
- [6] O. Beckman, “Halvledare,” Nationalencyklopedin. [Online]. Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%C3%A5ng/halvledare>, hämtad: 2023-03-17.
- [7] *Digital Multimeters 34460A, 34461A, 34465A (6½ digit), 34470A (7½ digit)*, USA: Keysight, 2022. [Online]. Tillgänglig: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-03846/data-sheets/5991-1983.pdf>, hämtad: 2023-04-03.
- [8] L. Hellberg, “F5 Halvledare,” Chalmers Tekniska Högskola och Göteborgs Universitet, Göteborg, Sverige, 2019. [Online]. Tillgänglig: [https://chalmers.instructure.com/courses/22489/files/2596376?module\\_item\\_id=349907](https://chalmers.instructure.com/courses/22489/files/2596376?module_item_id=349907), hämtad: 2023-04-03.
- [9] C. Nordling och J. Österman, *Physics Handbook*, 9e uppl., Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2020.

# Bilagor

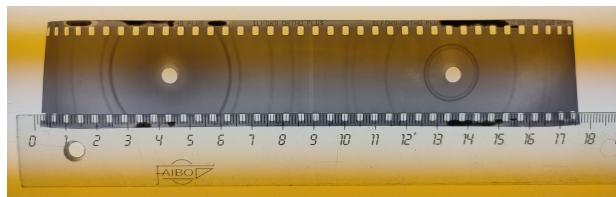
## A Tillåtna reflexer

Tabell 3: Tillåtna Miller-index ( $hkl$ ) för diffraktion med data från [3].

Struktur	Tillåtna ( $hkl$ )
SC	Alla
BCC	$h + k + \ell$ jämnt
FCC	Alla $h, k, \ell$ jämma eller alla $h, k, \ell$ udda

## B Övriga resultat

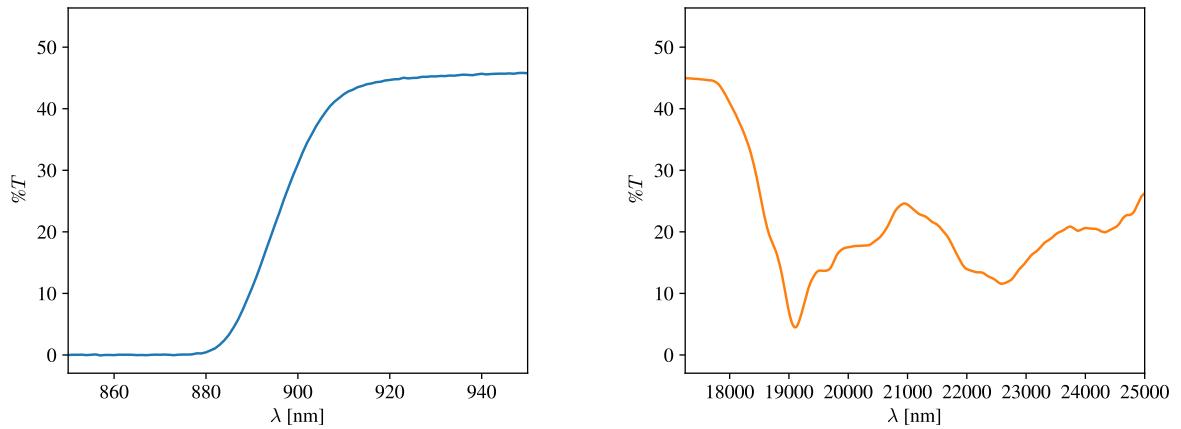
### B.1 Grundämnesbestämning och GaAs optiska transmission



Figur 7: Den exponerade filmen efter det andra försöket, vilket gav tydliga tecken på diffraktion på provet.

Tabell 4: Värdena på parametrarna  $r$ ,  $\theta$ ,  $\lambda$  och gitterparametern  $a$  från diffraktionsmönstret i figur 7 ovan med felmarginaler. Detta var det slutgiltiga värdet på  $a$ .

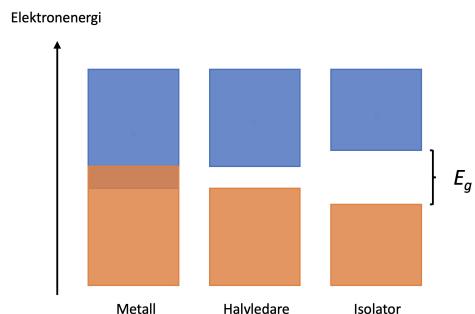
$r$ (cm)	$\theta$ (rad)	$\lambda$ (Å)	$a$ (Å)
$1,925 \pm 0,05$	$0,3359 \pm 0,0087$	1,5413	$4,049 \pm 0,101$
$2,225 \pm 0,05$	$0,3883 \pm 0,0087$	1,5413	$4,071 \pm 0,087$
$3,250 \pm 0,05$	$0,5672 \pm 0,0087$	1,5413	$4,057 \pm 0,056$
$3,900 \pm 0,05$	$0,6806 \pm 0,0087$	1,5413	$4,062 \pm 0,044$
<b>Medelvärde</b>	—	—	$4,060 \pm 0,072$



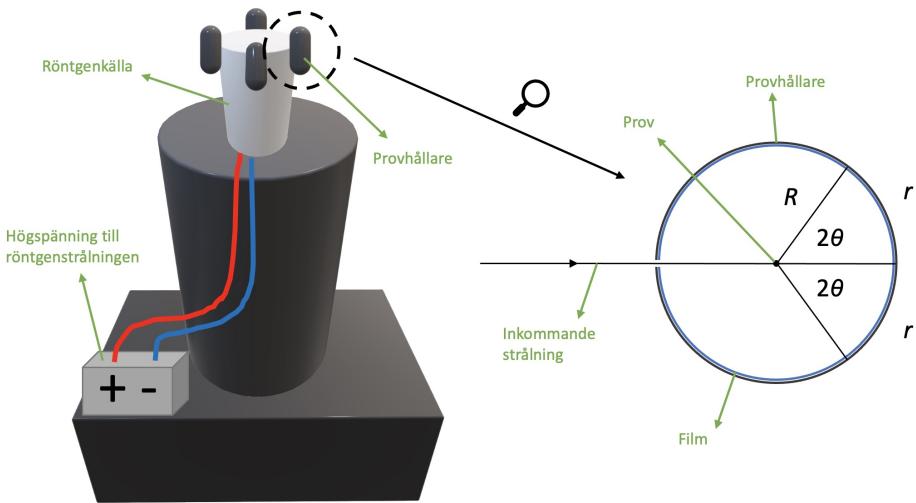
Figur 8: Uppmätt transmissionsspektrum för GaAs i 850 – 950 nm med Cary 5000 t.v. (blå graf) och 17250 – 25 000 nm med Perkin Elmer 1725 t.h. (orange graf).

## C Övriga figurer

### C.1 Grundämnesbestämning och GaAs optiska transmission



Figur 9: Illustration över bandgapet i halvledare och isolatorer, jämfört med metaller.



Figur 10: Enkel illustration över en Debye-Scherrer kamera. Högspänningsgeneratorn alstrar röntgenstrålning som i sin tur diffrakterar provet med ämnet. Med hjälp av geometriska förhållanden kunde sedan Braggs lag användas för att bestämma det okända ämnet.



Figur 11: Till vänster en översiktsbild på Debye-Scherrer-kameran som användes vid grundämnesbestämningen. I mitten en närbild på kamerorna vilka innehåller proverna (2 - 5) samt röntgenkällan i mitten (1). Till höger en av kamerorna med monterat prov i mitten.

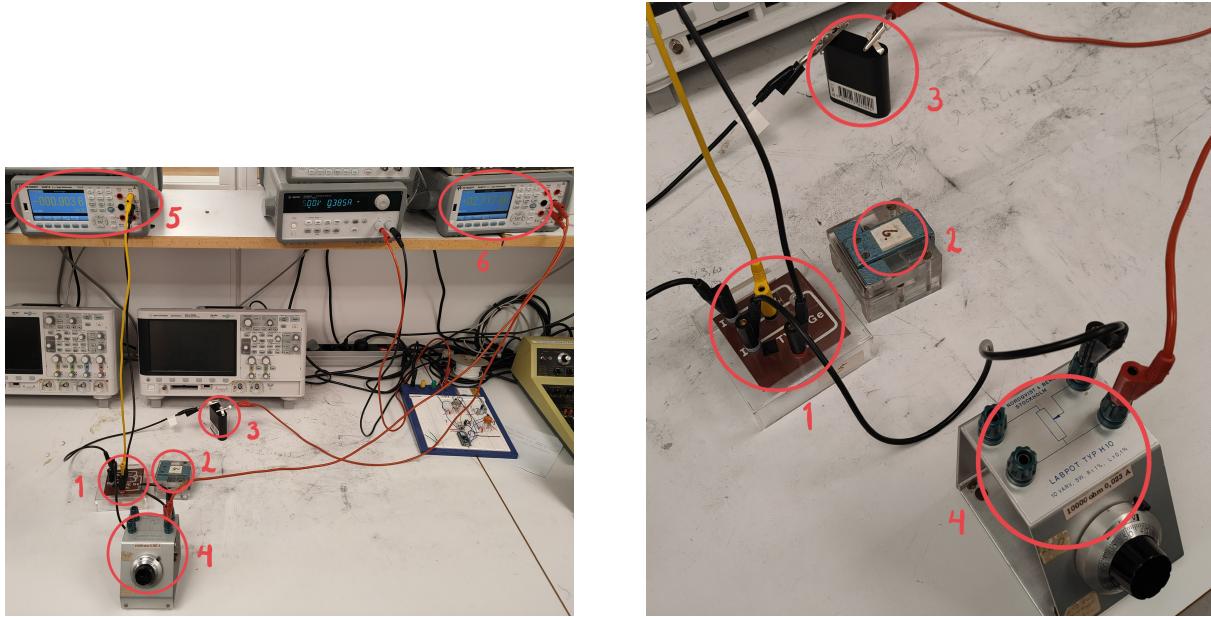


Figur 12: Den ljustäta behållaren som används vid framkallningen av filmen i försöket med Debye-Scherrer-kameran. I bakgrunden syns också framkallnings- och fixeringsvätskorna för detta syfte.



Figur 13: Spektrometrarna som användes då den optiska transmissionen för GaAs studerades. Den röda cirkeln visar luckan som öppnades för att placera provet i instrumentet.

## C.2 Halleffekt i dopat Germanium



Figur 14: Uppställningen som användes för att mäta Halleffekten i en dopad Ge-kristall. Ett kretskort med kristallen (1) fördes in i en permanentmagnets (2) fält. Ett batteri (3) samt en 10-varvs potentiometer (4) användes för att kontrollera strömmen i kretsen, där Hallspänningen och strömmen genom kristallen mättes med digitala multimetrar (5, 6). Denna figur motsvarar alltså kopplingsschemat i figur 3.

## D PYTHON-kod

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # LaTeX font
5 plt.rcParams['mathtext.fontset'] = 'cm'
6 plt.rcParams['font.family'] = 'STIXGeneral',
7 font_size = 12
8
9 theta = [0.335951134, 0.388307155, 0.567190227, \
10      0.680628272]
11 r = [1.925, 2.225, 3.25, 3.9]
12 SC = [1, 2, 3, 4]
13 BCC = [2, 4, 6, 8]
14 FCC = [3, 4, 8, 11]
15
16 X = []
17 Y = []
18 Z = []
19
20 for i in range(4):
21     X.append(np.sin(theta[i])**2/SC[i])

```

```

22     Y.append(np.sin(theta[i])**2/BCC[i])
23     Z.append(np.sin(theta[i])**2/FCC[i])
24
25 plt.figure(figsize=(8, 5))
26 plt.plot(SC,X, 'x-', label='SC')
27 plt.plot(BCC,Y, 'x-', label='BCC')
28 plt.plot(FCC,Z, 'x-', label='FCC')
29 plt.xlabel('$h^2 + k^2 + \ell^2$', \
30             fontsize=font_size)
31 plt.ylabel('$\frac{\sin^2(\theta)}{h^2 + k^2 + \ell^2}$', fontsize=font_size)
32 plt.xticks([1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11], \
33             fontsize=font_size)
34 plt.yticks(fontsize=font_size)
35 plt.legend(fontsize=font_size)
36 plt.show()
37 #%%
38
39 import numpy as np
40 import matplotlib.pyplot as plt
41
42 # LaTeX font
43 plt.rcParams['mathtext.fontset'] = 'cm'
44 plt.rcParams['font.family'] = 'STIXGeneral'
45 font_size = 12
46
47 B = 0.135
48 d = 0.0005
49
50 forsok1_V = np.array([18.5,10.4,7.25,5.56,4.52,3.8,\n
51     3.28,2.89,2.52,2.28,2.09,1.92,1.78,1.66,1.55,\n
52     1.45,1.37,1.3,1.23,1.17])
53 forosk1_I = np.array([6.803,3.81,2.654,2.034,1.65,\n
54     1.387,1.198,1.053,0.92,0.832,0.76,0.699,0.648,\n
55     0.603,0.564,0.53,0.5,0.473,0.449,0.427])
56
57 coeffs = np.polyfit(forosk1_I,forsok1_V,1)
58 print(coeffs)
59
60 x_vec = np.linspace(0,10,100)
61
62 print('R_H = '+str(coeffs[0]*d/B))
63
64 plt.xlabel('Ström genom Ge-kristallen (mA)', \
65             fontsize=font_size)
66 plt.ylabel('Hallspänning (mV)', fontsize=font_size)
67 plt.xlim([0,8])
68 plt.ylim([0,20])
69 plt.plot(x_vec,coeffs[1]+coeffs[0]*x_vec,'k',\
70             label='Regression')
71 plt.plot(forosk1_I,forsok1_V,'ro', label='Datapunkter')
72 plt.text(6,7.5,'$k$ =' + str(round(coeffs[0],3)), \

```

```

73     fontsize=12)
74 plt.legend(fontsize=font_size)
75 plt.title('Ge-kristall 7, kretskort 4')
76 plt.show()
77 # %%
78 import numpy as np
79 import matplotlib.pyplot as plt
80
81 # LaTeX font
82 plt.rcParams['mathtext.fontset'] = 'cm'
83 plt.rcParams['font.family'] = 'STIXGeneral',
84 font_size = 12
85
86 B = 0.135
87 d = 0.0005
88
89 forsok1_V = np.array([-16.6,-9.15,-6.31,-4.88,-3.96,\n
90                         -3.33,-2.87,-2.52,-2.2,-2,-1.82,\n
91                         -1.67,-1.55,-1.44,-1.36,-1.27,-1.2,-1.15,-1.08,-1.04])
92 forosk1_I = np.array([7.063,3.912,2.705,2.069,1.674,\n
93                         1.405,1.212,1.065,0.929,0.841,0.768,0.706,0.653,\n
94                         0.608,0.569,0.535,0.504,0.477,0.452,0.431])
95
96 coeffs = np.polyfit(forosk1_I,forsok1_V,1)
97 print(coeffs)
98
99 x_vec = np.linspace(0,10,100)
100
101 print('R_H = '+str(coeffs[0]*d/B))
102
103 plt.xlabel('Ström genom Ge-kristallen (mA)', \
104             fontsize=font_size)
105 plt.ylabel('Hallspänning (mV)', fontsize=font_size)
106 plt.xlim([0,8])
107 plt.ylim([-20,0])
108 plt.plot(x_vec,coeffs[1]+coeffs[0]*x_vec,'k',\
109             label='Regression')
110 plt.plot(forosk1_I,forsok1_V,'ro',label='Datapunkter')
111 plt.text(1.5,-12.5,'$k$ =' + str(round(coeffs[0],3)),\
112             fontsize=12)
113 plt.xticks(fontsize=font_size)
114 plt.yticks(fontsize=font_size)
115 plt.legend(fontsize=font_size)
116 plt.title('Ge-kristall 6, kretskort 5')
117 plt.show()
118 # %%
119 from math import *
120 import numpy as np
121 import matplotlib.pyplot as plt
122 from scipy.stats import norm
123 from tqdm import tqdm

```

```

124
125 k_varde = []
126 rep=5000000
127 K=[]
128 M=[]
129
130 for i in tqdm(range(1,rep)):
131     #xd=[7.063,3.912,2.705,2.069,1.674,1.405,1.212,\n
132     # 1.065,0.929,0.841,0.768,0.706,0.653,0.608,\n
133     # 0.569,0.535,0.504,0.477,0.452,0.431] + \
134     # 0.2*np.random.normal(loc=0.0, scale=1, size=20)
135     #yd=[-16.6,-9.15,-6.31,-4.88,-3.96,-3.33,-2.87,\n
136     # -2.52,-2.2,-2,-1.82,-1.67,-1.55,-1.44,-1.36,\n
137     # -1.27,-1.2,-1.15,-1.08,-1.04] + \
138     # 0.2*np.random.normal(loc=0.0, scale=1, size=20)
139     xd=[6.803,3.81,2.654,2.034,1.65,1.387,1.198,\n
140         1.053,0.92,0.832,0.76,0.699,0.648,0.603,\n
141         0.564,0.53,0.5,0.473,0.449,0.427] + \
142     0.2*np.random.normal(loc=0.0, scale=1, size=20)
143     yd=[18.5,10.4,7.25,5.56,4.52,3.8,3.28,2.89,2.52,\n
144         2.28,2.09,1.92,1.78,1.66,1.55,1.45,1.37,1.3,\n
145         1.23,1.17] + \
146     0.2*np.random.normal(loc=0.0, scale=1, size=20)
147 coeffs = np.polyfit(xd,yd,1)
148
149 k = coeffs[0]
150 m = coeffs[1]
151 K.append(k)
152 M.append(m)
153
154 #print((max(K)-min(K))/2)
155 #print(max(K)-np.mean(K))
156 #print(np.mean(K)-min(K))
157
158 #print((max(M)-min(M))/2)
159 #print(max(M)-np.mean(M))
160 #print(np.mean(M)-min(M))
161 mu1, std1 = norm.fit(K)
162 mu2, std2 = norm.fit(M)
163 print(std1,std2)
164
165 #%%
166 plt.figure(2)
167 plt.hist(K, bins=75, density=True, alpha=0.4, color='b')
168 xmin, xmax = plt.xlim()
169 x = np.linspace(xmin,xmax,1000)
170 p = norm.pdf(x, mu1, std1)
171 plt.plot(x, p, 'k', linewidth=2)
172 title1 = "Distributionen av värdet på $\it{k}$ efter \
173     " + str(rep) + " iterationer"
174 plt.title(title1)

```

```

175 plt.text(mu1-4*std1,65000,"\\u03c3 = " + \
176     str(round(std1,7)) + "\\n" + "p\\u2080 = 102731 Pa")
177 plt.xticks([mu1-4*std1,mu1-3*std1,mu1-2*std1,mu1-std1,\n
178     mu1,mu1+std1,mu1+2*std1,mu1+3*std1,mu1+4*std1], \
179     ['\\u03bc-4\\u03c3','\\u03bc-3\\u03c3','\\u03bc-2\\u03c3',\\
180     '\\u03bc-\\u03c3','\\u03bc', \
181     '\\u03bc+\\u03c3','\\u03bc+2\\u03c3',\\
182     '\\u03bc+3\\u03c3','\\u03bc+4\\u03c3'])
183
184 #%%
185 plt.figure(3)
186 plt.hist(M, bins=75, density=True, alpha=0.4, color='g')
187 ymin, ymax = plt.xlim()
188 y = np.linspace(ymin,ymax,1000)
189 P = norm.pdf(y, mu2, std2)
190 plt.plot(y, P, 'k', linewidth=2)
191 title2 = "Distributionen av värdet på $\\it{M}$$ efter \"\n
192     + str(rep) + " iterationer"
193 plt.title(title2)
194
195 plt.text(mu2-4*std2,2.3,"\\u03c3 = " + str(round(std2,3))\
196     + "\\n" + "p\\u2080 = 102731 Pa")
197 plt.xticks([mu2-4*std2,mu2-3*std2,mu2-2*std2,mu2-std2,\n
198     mu2,mu2+std2,mu2+2*std2,mu2+3*std2,mu2+4*std2], \
199     ['\\u03bc-4\\u03c3','\\u03bc-3\\u03c3','\\u03bc-2\\u03c3',\\
200     '\\u03bc-\\u03c3','\\u03bc', \
201     '\\u03bc+\\u03c3','\\u03bc+2\\u03c3','\\u03bc+3\\u03c3',\\
202     '\\u03bc+4\\u03c3'])
203
204 plt.show()

```

# E Labblogg

## Labblogg – Fasta Tillståndets Fysik

Tisdag 2023-03-28

11:00

Introduktion med Lars Hellberg.

### Cary Spektrometer

11:45

Problem med inloggning på tillhörande dator. Tangentbordet verkar vara felprogrammerat (visar sig vara inställt på franskt tangentbord), när det väl verkar lösa sig går det ändå inte att logga in med studentkonto. Skickar till handledare och frågar, förbereder lite prover till diffraktionen så länge. Detta görs med fil (mindre och tätare packat med fler orienteringar ökar chansen för diffraktion) och sedan används ett papper för att få ned spånen i provrören.

12:30

Lyckas nu komma in genom att starta om datorn. Bekantar oss med mjukvaran och kör en baselinemätning på ett tomt prov i intervallet 175-3300 nm.

13:00

Nu börjar vi mäta på GaAs.

Mäter "GaAs1" (600nm steglängd), sparar data i csv, bsw.

Mäter "GaAs2" (300nm steglängd), sparar data i csv, bsw.

Mäter "GaAs\_g" (600nm steglängd), sparar data i csv, bsw.

Överför filerna till våra datorer.

Ser tydligt fall mot 0 vid cirka 800-900 nm, förväntat bandgap.

### Perkin Elmer

13:30

Bekantar oss med mjukvaran och ställer in rätt paths för filerna att sparas i (vissa problem med att inställningarna är kvar från förra gruppen). Kör sedan en bakgrundsmätning.

Nu börjar vi mäta på GaAs (background där det behövs, ej utskrivet):

"Student01" (Resolution: 4cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample)

"Student02"

"Student03" (Resolution: 1cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> dålig (brus, verkar bero på liten resolution)

"Student04" (Resolution: 2cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> glömde sätta i prov...

"Student05" (Resolution: 2cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> ganska dålig, liten resolution

"Student06" (Resolution: 8cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> bra, större resolution

"Student07" (Resolution: 16cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> bra

Mäter GaAs (background utskrivet då det körs):

Background

"Student08" (Resolution: 1cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> dålig

Background

"Student09" (Resolution: 2cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> lite bättre

Background

"Student10" (Resolution: 4cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> bra  
"Student11" (Resolution: 8cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> bra  
"Student12" (Resolution: 16cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> bra

Obs. dessa mätningar går senare förlorade pga oklar anledning. Vi gör om senare.

**Debye-Scherrer**

12:10

Börjar fila upp prov B (grå/silver-aktig, mjuk metall, förmodligen Al). Fyller tre prövrör.

15:40

Monterar proven i mörker, vi använder en kamera (dvs ett prov) och den andra gruppen två kameror (en fungerade ej vid test).

Startar maskinen enligt instruktioner och gör en körsling (40 min).

Framkallar (10 min) och fixerar proven (5min).

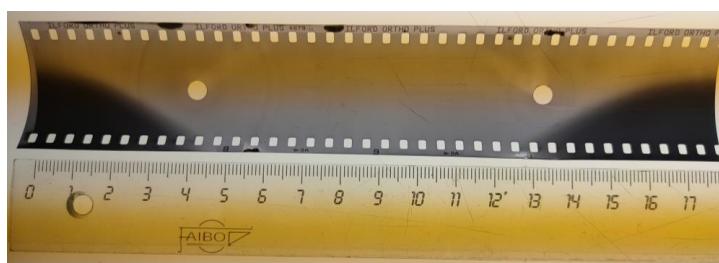
17:30

Analyserar filmen, mha. mätningar och Excel-dokument.

Stor ring: Mindre: 3.4cm Större: 4.0cm

Liten ring: Mindre: 1.55cm Större: 1.75cm

Motsvarar ungefär gitterparameter 4.5 och FCC. Osäkert resultat, matchar inga grundämnen direkt och ringarna var ganska otydliga.



Vi gör om detta imorgon och hoppas på tydligare ringmönster innan vi går vidare med noggrannare analys.

18:00

Hemgång

Onsdag 2023-03-29

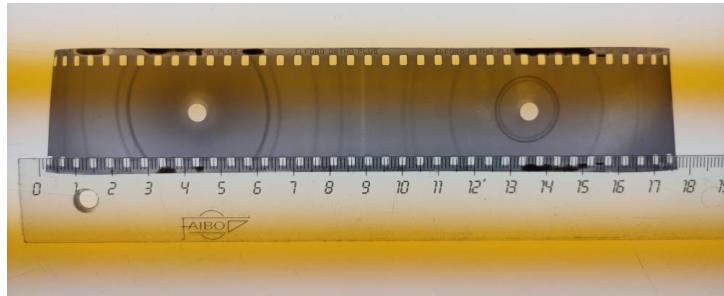
**Debye-Scherrer**

10:30

Sätter igång ny mätning på ett prov. 40 min, 10 min framkallning, 4 min fixering.

12:30

Får fram ett mycket bra resultat på filmen nu omgång två.



Vänstra sidan, cm:

3.85

4.45

(6.50)

(7.80)

Högra sidan, cm:

1.55

1.75

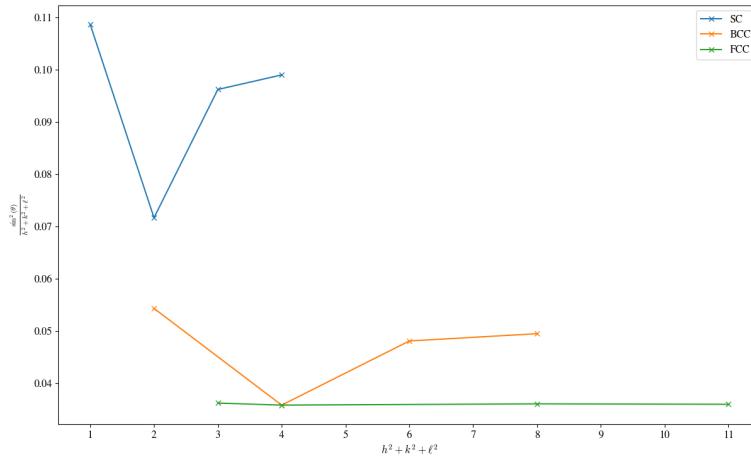
(4.25)

(6.30)

(6.80)

theta	r	sin^2(theta)	SC	sin^2/(h^2+k^2+l^2) BCC		sin^2/(h^2+k^2+l^2) FCC		sin^2/(h^2+k^2+l^2)	
19,248582	0,3359511	1,925	0,108680517	1	0,108680517	2	0,054340258	3	0,036226839
22,248361	0,3883072	2,225	0,143354728	2	0,071677364	4	0,035838682	4	0,035838682
32,497606	0,5671902	3,25	0,288653004	3	0,096217668	6	0,048108834	8	0,036081626
38,997127	0,6806283	3,9	0,395995115	4	0,098998779	8	0,049499389	11	0,035999556
			a =	4,0490334					
				4,0709012					
				4,057173					
				4,061795					

Gitterparametern blir således  $a=4,0597 \text{ \AA}$  (genomsnitt). FCC tycks stämma bra överens, se även nedan figur:



Aluminium har enligt tabell  $a=4,05 \text{ \AA}$  och är FCC. Våra resultat stämmer väl överens med detta. Vi tror att ämne B är aluminium. Det ser också ut som aluminium.

(Silver har också FCC med den något större  $a = 4,09 \text{ \AA}$  och är inte lika mjukt som Al)

#### Halleffekt

11:30

Börjar med extrauppgiften, problem med att använda potentiometern/mäta ström. Går över till lite Debye-Scherrer medan vi väntar på hjälp. Lunch.

14:30

Hjälp kommer men vi löser det genom att mäta strömmen med en digital multimeter istället. Mäter strömmen med en bänkmultimeter istället och spänningen med en handmultimeter. Ge-platta 5 (magnet 6).

Mätserie: Se figuren nedan med de övriga mätserierna under dessa försök.

16:45

Nu tillgång till multimeter både för ström och spänningsmätning. Funderar hur vi ska säkerställa korrekt mätning med avseende på +- . Och vad fyller egentligen reglaget på Ge-plattan för roll? Vi återkommer till detta imorgon. Går hem.

#### Perkin Elmer

15:15

Tidigare data verkar ha gått förlorad, gör nya mätningar

Background

“Student00” (Resolution: 1cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample)

Background

“Student01” (Resolution: 2cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> glömde lägga i provet

“Student02” (Resolution: 2cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample)

Background

“Student03” (Resolution: 4cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample) -> glömde lägga i provet

“Student04” (Resolution: 4cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample)

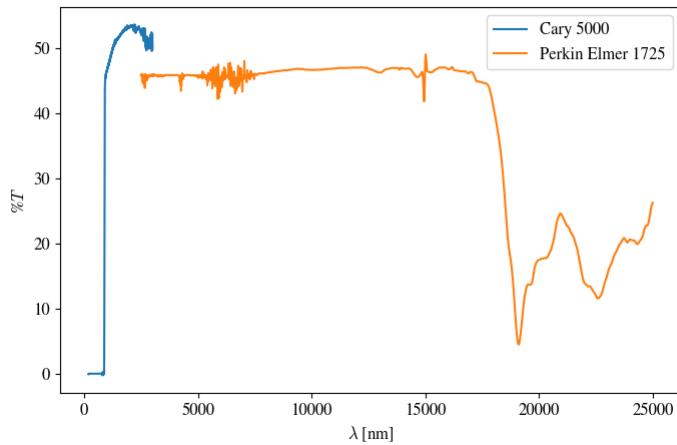
“Student05” (Resolution: 4cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample)

“Student06” (Resolution: 8cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample)

“Student07” (Resolution: 16cm-1, 2500-25000nm, scan type: sample)

Sparar över datan direkt.

Sammanfogar mätning med Cary 5000 och Perkin Elmer 1725, mätningar “GaAs\_g” respektive “Student04”, resulterar i nedanstående graf. Vi testar andra mätningar senare.



Bandgapet syns tydligt. Vid inzooming i Python ser vi att det ligger omkring 883nm. Tabellvärdet är cirka 873nm (1.42eV). Grafens utseende verkar i övrigt stämma relativt väl överens med andra källor. Vi är nöjda med detta preliminära resultat.

17:30  
Hemgång

Torsdag 2023-03-30

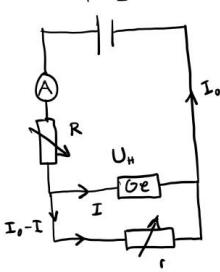
#### Halleffekt

10:15

Sätter igång och kopplar upp kretsen. Funderar på om vi verkligen har rätt ström, ritar upp kopplingsschema och tänker att strömmen måste dela upp sig mellan potentiometer och Ge-platta, om resistansen i potentiometern är liten (väldigt liten, hur ser man detta?). Men förmodligen gör endast lite resistans i denna att all ström går genom Ge-plattan. Detta confirmas av handledaren som också tipsar om att få hallspänning 0 med hjälp av potentiometern innan magnetfält läggs på för att lösa problem med kontaktiering och kristallens assymmetri (detta står också i ett labb-pm från fasta-kursen som vi sett).

Ställer in trimpotentiometern så att spänningen = 0 då inget magnetfält är pålagt (vid 0.5kOhm på potentiometern). Lägger sedan på magnetfält och påbörjar mätning av ström och spänning, när potentiometers resistans ändras i steg om 0.5kOhm från 0.5kOhm till 10kOhm. Vi gör detta för Ge-kristall 6 (5) och sedan för kristall 7 (4). Vi använder magnet 6 med 0.135 T.

Kretsar och mätserier visas nedan. (Här visas också den första mätserien från igår högst upp t.v.)



Kristall 6						Kristall 6					
I (mA)	R	V_H (mV)	B	d	R_H	I (mA)	R	V_H (mV)	B	d	R_H
9,044	0,135	-41,4	350	0,0005	0,0395415	7,063	0,135	-16,6	500	0,0005	-0,008705
8,931	0,135	-39,9	400	0,0005	0,0395498	7,075	0,135	-16,6	500	0,0005	-0,008703
8,819	0,135	-37,4	1000	0,0005	0,0395661	7,087	0,135	-16,6	500	0,0005	-0,008694
2,631	0,135	12,1	1500	0,0005	0,03964672	2,069	0,135	-4,88	2000	0,0005	-0,007396
2,539	0,135	9,3	1500	0,0005	0,03964713	2,081	0,135	-4,88	2000	0,0005	-0,007393
1,642	0,135	7,5	2500	0,0005	0,03971039	1,405	0,135	-3,33	8000	0,0005	-0,007788
1,530	0,135	5,7	3500	0,0005	0,03971113	1,212	0,135	-2,87	4000	0,0005	-0,007777
1,119	0,135	5,4	3500	0,0005	0,03986723	1,045	0,135	-2,52	4000	0,0005	-0,007944
1,046	0,135	4,7	4000	0,0005	0,0398641	0,929	0,135	-2,2	4500	0,0005	-0,007711
0,973	0,135	4,3	4000	0,0005	0,03986483	0,841	0,135	-1,97	5000	0,0005	-0,007698
0,846	0,135	3,7	5000	0,0005	0,03985944	0,768	0,135	-1,82	5500	0,0005	-0,007777
0,775	0,135	3,1	6000	0,0005	0,03984921	0,686	0,135	-1,67	6000	0,0005	-0,007761
0,651	0,135	3,1	6000	0,0005	0,03984921	0,633	0,135	-1,55	6000	0,0005	-0,007911
0,642	0,135	2,9	6000	0,0005	0,03973026	0,608	0,135	-1,44	7000	0,0005	-0,007721
0,597	0,135	2,7	6000	0,0005	0,03973026	0,535	0,135	-1,35	7000	0,0005	-0,007602
0,559	0,135	2,5	7500	0,0005	0,03985897	0,535	0,135	-1,27	8000	0,0005	-0,008792
0,524	0,135	2,3	7500	0,0005	0,03985897	0,535	0,135	-1,2	8000	0,0005	-0,008718
0,496	0,135	2,2	8500	0,0005	0,03947718	0,477	0,135	-1,15	9000	0,0005	-0,008929
0,469	0,135	2,1	9000	0,0005	0,03958748	0,452	0,135	-1,08	9500	0,0005	-0,008885
0,442	0,135	2,0	9000	0,0005	0,03958748	0,431	0,135	-1,04	10000	0,0005	-0,008781
0,423	0,135	1,9	10000	0,0005	0,039646021						-0,008784
						0,016729991					7,10653E+20

Preliminära resultat visar

Kristall 6 (5):  $R_H = -0.0088$ ,  $n$  (elektronkoncentration)= $7.1E+20$  --> n-dopad

Kristall 7 (4):  $R_H = 0.10$ ,  $p$  (hål-koncentration)= $6.2E+20$  --> p-dopad

Vi tror att tecknen/n/p ska vara rätt, men krävs lite efterarbete för att bekräfta detta.

Känns som rimliga storleksordningar då denna kristall var dopad och vanliga halvledare har  $R_H$  i storleksordning E-10. Även mängden

