

מספר הקורס:	114037
מספר הקבוצה:	22
תת-קבוצה:	7
עמדת עבודה:	3
שם המדריך:	גיטלמן איגור
מגישים:	מאור, נתיב , 319002911, nativ.maor@campus.technion.ac.il
	שחם, דור , 318258555, dor-hay.sha@campus.technion.ac.il
תאריך:	13/5/2023
דו"ח מסכם לניסוי:	Hall

אפקט הול במוליך למחצה עשוי גרמניום - מציאת סוג תכונות נושאי המטען, מגנטורסיסטנס ופער האנרגיה בין
פס ההולכה לפס הערכיות

שם: נתיב מאור | ת"ז: 319002911 | דוא"ל: nativ.maor@campus.technion.ac.il

שם: דור חי שחם | ת"ז: 318258555 | דוא"ל: dor-hay.sha@campus.technion.ac.il

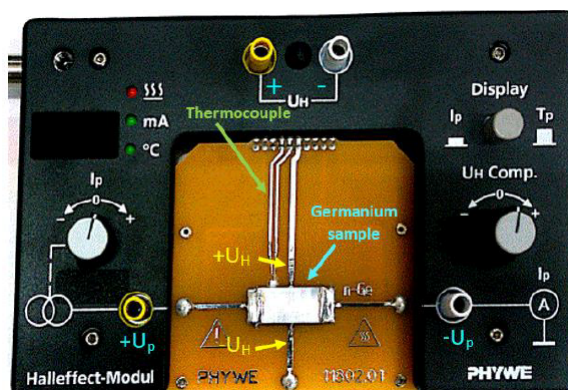
May 13, 2023

תקציר

בניסוי זה נחקרה התופעה של אפקט הול במוליך למחצה העשוי מדגם גרמניום (Ge). הניסוי בוצע במספר שלבים שבכל אחד מהם חובר המוליך למחצה למעגל חשמלי בתנאים משתנים (כגון זרם משתנה העובר דרך המוליך, שדה מגנטי הניצב לדוגמית וטמפרטורה) נמדדו תכונות המעגל כתלות בתנאים אלו ומהם הוסקו תכונות המערכת. בחלק 0, כחלק מקדים על מנת למדוד את התנגדות הדגם נמדד המתח עליו כתלות בזרם. לאחר מכן, בחלק 1, הופעל שדה מגנטי קבוע ונמדד מתח הול כתלות בזרם, לפי מתח זה וכיוון השדה המגנטי נקבע סוג נושאי המטען, צפיפותם והמוביליות שלהם. בחלק 2, הוסקו גדלים אלו במדידה שונה, של מתח הול כאשר הזרם היה קבוע והשדה המגנטי הוא זה שהשתנה. בחלק 3, נמדדה התנגדות הדגם כתלות בשדה המגנטי - תלות הנקראת מגנטורסיסטנס. בדקנו האם התלות הנצפית מוסברת במידה מספקת על ידי קיום שני סוגי נושאי מטען או שלאפקט של גודל סופי של הדגם יש גם תרומה לאפקט ואם כן איזה מהתופעות היא הדומיננטית יותר ונמצא שהאפקט הראשון הוא הדומיננטי. בחלקים 4 ו-5 נמדדו המתחים כתלות בטמפרטורה ומתלות זו בחלק מתחום מהמדידות הוסק פער האנרגיה - הפרש האנרגיה בין פס ההולכה לפס הערכיות, ערך זה הושווה לערך המקובל בספרות ונמצא שעבור מדידה 4 הערך בחפיפה ועבור מדידה 5 אינו בחפיפה.

מבוא

מערכת הניסוי בחלקיו השונים הורכבה מרכיב "מודול-אפקט הול" המכיל דגם Ge שניתן לשלוט דרכו על הזרם I_p העובר ברכיב ובמתח הול U_H . כמו כן, ניתן למדוד את המתחים, U_p המתח במעגל דרכו זורם הזרם דרך הרכיב ואת U_H . כמו כן, המרכיב מכיל צג בו ניתן לצפות בטמפרטורה של הדגם T_p או בזרם I_p . בנוסף ישנה אפשרות לחמם את הדגם על ידי לחיצה על כפתור חימום. הרכיב מוצג בתמונה הבאה:



איור 1: חלקו הקדמי של מרכיב "מודול-אפקט הול" (איור 6 בתדריך)

בתמונה מוצג דגם ה- Ge והמעגל אליו הוא מחובר עם מתגי השליטה בו, הצג וחיבורים למדידת המתח. כפתור החימום נמצא בצד האחורי.

המודול הורכב על גבי ליבת ברזל בצורת U שעל כל זרוע בה הוצב סליל בצורה כזו כך שבעת הזרמת זרם דרך הסליל נוצר שדה מגנטי דרך הליבה ועובר דרך רכיב ה- Ge שעל המודול.

סידור מערכת הניסוי בשלמותו, יחד עם ספק הזרם, מד המתח והמגנטומטר מוצגים בתמונה הבאה:



איור 2: תמונה של מערכת הניסוי עם מכשירי המדידה (איור 8 בתדריך)

בצד ימין ניתן לראות את הולטמטר מתחת למגנטומטר, באמצע את המודול שהורכב על הליבה המגנטית והסלילים ומימין את ספק הזרם.

אפקט הול במוליך מלבני הוא אפקט שבו בעת הזרמת זרם דרך מוליך, עקב הפעלת שדה מגנטי ניצב לכיוון הזרם, נוצר כוח⁴ על נושאי המטען הניצב לזרם ולשדה (לפי כוח לורנץ) וגורם להצטברות מטענים מנוגדים בשניים מדפנות המוליך - הצטברות המטענים על הדפנות מבוטאת בהפרש מתחים הניתן למדידה הנקרא מתח הול ומסומן בניסוי זה ב U_H . במקרה שבו יש נושא מטען יחיד עיקרי, בהנתן זרם דרך הדגם $I - [A]$, עובי הדגם $d - [m]$ ושדה מגנטי $B - [T]$ קבועים הביטוי למתח הול פרופורציוני לגודל הנקרא קבוע הול $R_H - [\frac{m^3}{C}]$ על ידי הנוסחה הבאה:

$$(1) \quad R_H = \frac{U_H d}{IB} = \frac{1}{nq}$$

$n - [\frac{1}{m^3}]$ היא צפיפות המטען ו $q - [C]$ הוא מטען נושאי המטען. המוביליות של נושאי המטען $\mu - [\frac{m^2}{V \cdot sec}]$ נתונה על ידי הקשר הבא:

$$(2) \quad \mu = \frac{\sigma}{nq} = \frac{|R_H|}{\rho_0}$$

כש $\sigma - [\frac{1}{\Omega \cdot m}]$ היא המוליכות ו ρ_0 היא ההתנגדות הסגולית של הדגם בהנחה של **חומר איזוטרופי** כשהשדה המגנטי הוא 0. **מה זה חומר איזוטרופי?** ρ_0 נתון על ידי

$$(3) \quad \rho_0 = \frac{R_0 \cdot d \cdot W}{L}$$

כש $R_0 - [\Omega]$ היא התנגדות הדגם כשלא מופעל עליו שדה מגנטי, $W - [m]$ רוחב הדגם ו $L - [m]$ הוא אורכו. במערכת שלנו $d = 1[mm]$, $L = 16[mm]$ $W = 10[mm]$.

בחלקים 1 ו 2 של הניסוי השתמשנו בהתאמה של המדידות לנוסחאות אלה כדי למצוא את המוביליות של נושאי המטען בהנחה שיש נושא מטען יחיד עיקרי.

בחלק 3, אנו מודדים את U_p כתלות בשדה המגנטי ובודקים האם ישנה התאמה לכך שהרכיבים של טנזור ההתנגדות הסגולית תלויים ריבועית בשדה המגנטי ברכיבים האלכסוניים ושהרכיבים הלא אלכסוניים תלויים לינארית לפי

$$(4) \quad \rho_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{e(\mu_e n + \mu_h p)} + B^2 \frac{\mu_e n \mu_h p (\mu_e + \mu_h)^2}{e \cdot (\mu_e n + \mu_p p)^3} & i = j \\ B \cdot \frac{\mu_h^2 p - \mu_e^2 n}{e \cdot (\mu_e n + \mu_p p)^2} = B \cdot R_H & ij = yx \\ -B \cdot \frac{\mu_h^2 p - \mu_e^2 n}{e \cdot (\mu_e n + \mu_p p)^2} = -B \cdot R_H & ij = xy \end{cases}$$

כש $\mu_{e,p} - [\frac{m^2}{V \cdot sec}]$ הן המוביליות של האלקטרונים (e) או החורים (p), $p - [\frac{1}{m^3}]$ צפיפות החורים ו $e - [C]$ הוא גודל מטען נושאי המטען שבמקרה שלנו הוא כמטען האלקטרון. בנוסף R_H מוגדר בנוסחא זו ברכיב ρ_{yx} עבור יותר מנושא מטען אחד (שונה מההגדרה הקודמת).

קיימת תלות נוספת של שינוי ההתנגדות של הדגם כתלות בשדה המגנטי עקב אפקט גיאומטרי הנתון לפי

$$(5) \quad R(B) - R(0) = \frac{4\rho_{xx}}{\pi d} \frac{\Theta^2}{(\frac{\pi}{2})^2 - \Theta^2} = \frac{4}{\pi d} \frac{\rho_{xx}^3 \rho_{xy}^2}{(\frac{\pi}{2})^2 \rho_{xx}^2 - \rho_{xy}^2}$$

בחלק 3 אנו מודדים איזה מן ההשפעות נצפית בצורה משמעותית יותר בתוצאות הניסוי שלנו. במוליכים למחצה כמו דגם Ge איתו עבדנו קיים קשר בין טמפרטורת הרכיב להתנגדות שלו - קשר זה נבדק בחלקים 4 ו5 כשהציפיה מהתיאוריה היא שיתקיים שבטמפ' גבוהות כאשר המל"מ בתחום האינטרינזי מתקיים

$$(6) \quad U_{H/p} \sim \frac{1}{n_i} \sim e^{\frac{E_g}{2k_B T}} \Rightarrow \ln U_{H/p} = K + \frac{E_g}{2k_B} T^{-1}$$

כאשר K הוא קבוע פרופורציה חסר יחידות המתאים לפרופורציה בין U_H לאקספוננט, $k_B = 8.617 \cdot 10^{-5} [\frac{eV}{K}]$ קבוע בולצמן, $E_g - [eV]$ פער האנרגיה ו $T - [K]$ טמפרטורת הדגם.

תוצאות הניסוי

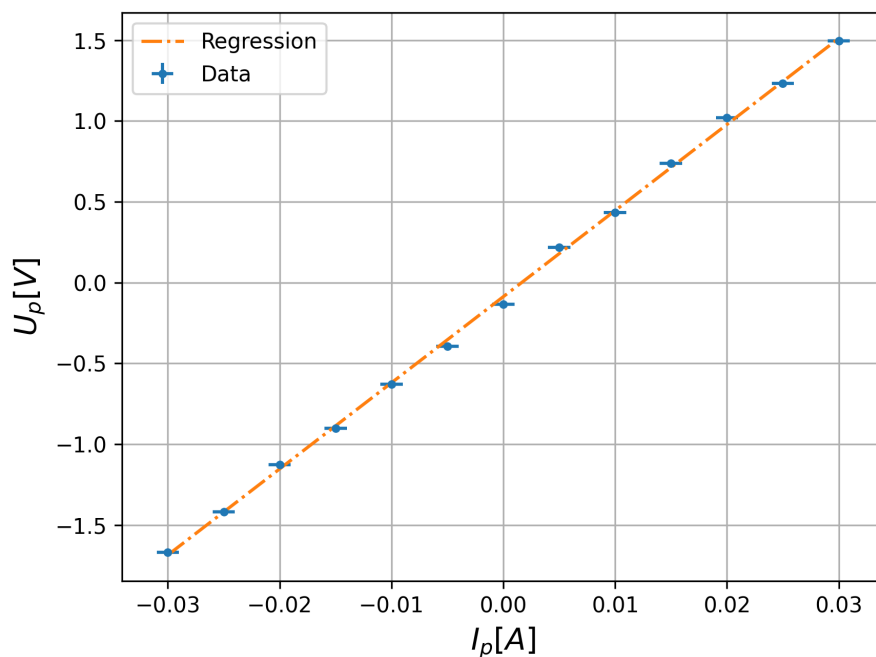
חיברנו את המערכת כפי שמצוין באיור 1.

חלק 0: מדידה של המתח U_p כפונקציה של הזרם I_p

הסרנו את החלק המודד את השדה המגנטי וחיברנו את המולטימטר במקביל למתח U_p . ביצענו דגימות של מתח זה עבור

זרמים I_p בין בתחום $\pm 30mA$.

התקבלו התוצאות הבאות:



גרף 1: מתח הדגימה (U_p) כפונקציה של הזרם I_p

ציר ה- x מייצג את הזרם I_p ב- A וציר ה- y את המתח U_p ב- V . הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות שנלקחו והקו הכתום את הרגרסיה שבוצעה לנתונים.

ניתן לשים לב שמבחינה איכותית הגרף לינארי בקירוב טוב כפי שהיינו מצפים מחוק אוהם. לגרף בוצעה רגרסיה לינארית והתקבלה הפונקציה הבאה

$$y = (53.3 \pm 0.9) x + (-0.09 \pm 0.02)$$

עם התאמה של $R^2 = 0.9992$.

על פי חוק אוהם חילצנו את ההתנגדות

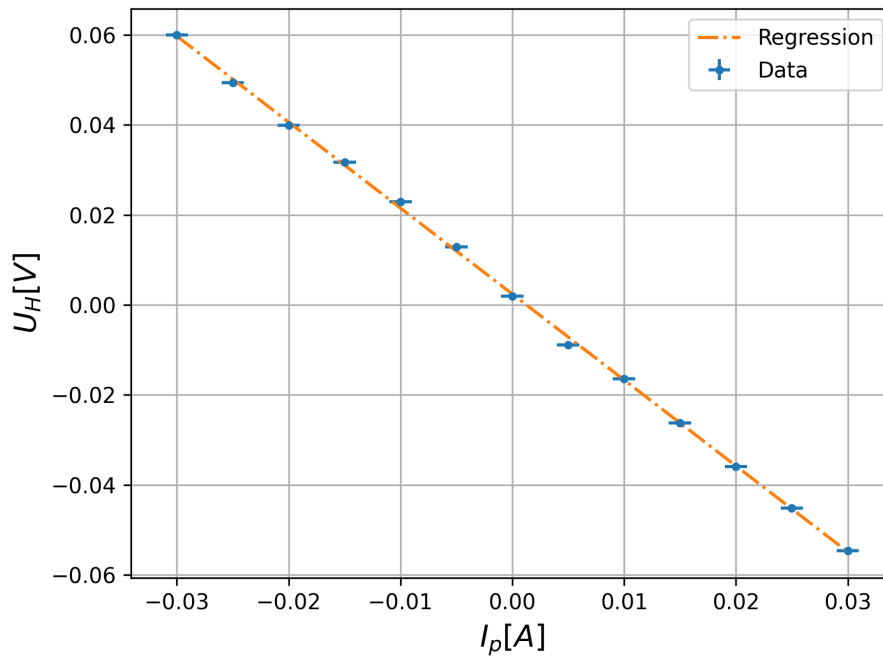
$$R_0 = 53.3 \pm 0.9 \Omega$$

חלק 1: מדידה של המתח הול U_H כפונקציה של הזרם I_p

כעת חיברנו את המולטימטר למדוד את מתח הול U_H . כילנו את הטסלמטר להציג שדה מגנטי אפסי כאשר המדיד רחוק מהמערכת ולאחר מכן הצבנו אותו במערכת כפי שמוצג בסרטוט.

הפעלנו מתח זרם על הסלילים המגנטיים כך שיווצר שדה מגנטי בעוצמה $251 \pm 1 mT$. בשלב זה כילנו את המערכת כך שהמתח U_H הנמדד במולטימטר יתאפס כאשר אין זרם I_p .

לאחר הכיול מדדנו את מתח הול כפונקציה של הזרם עבור זרמים $\pm 30 mA$ התקבלו התוצאות הבאות:



גרף 2: מתח הול (U_H) כפונקציה של הזרם I_p

ציר ה- x מייצג את הזרם I_p ב- A וציר ה- y את המתח U_H ב- V . הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות שנלקחו והקו הכתום את הרגרסיה שבוצעה לנתונים.

ניתן לראות כי באופן איכותי בקירוב טוב הגרף לינארי כפי שמוצג על פי נוסחא 1. לגרף בוצעה רגרסיה ליניארית והתקבלה

$$y = (-1.91 \pm 0.03)x + (0.0024 \pm 0.0005)$$

עם התאמה של $R^2 = 0.9995$. על פי נוסחא 1 ונתוני המערכת חולץ קבוע הול והתקבל

$$R_H^{(1)} = 0.0076 \pm 0.0002 \frac{m^3}{C}$$

מהדרך שבה נבנתה המערכת, מדידת מתח הול שלילי מעידה על הצטברות מטענים חיובים (חורים) בחלקו התחתון של המל"מ (או מטענים שלילים בחלקו העליון), לפי כיוון השדה המגנטי וכיוון הזרם נסיק שהאפשרות היחידה היא שאלו מטענים חיובים בתחתית המל"מ, כלומר המל"מ הוא $p - type$. תוצאה זו מסתדרת באופן מופתי עם זה שעל הלוח מצוין שהמל"מ שהוצב עליו הוא $p - type$.

מתוך הקשר 1 חולצה צפיפות רוב המטענים (החיובים) והתקבלה התוצאה:

$$p^{(1)} = (8.2 \pm 0.2) 10^{20} m^{-3}$$

בעזרת R_0 שחישבנו בחלק 0 וממדי המערכת חישבנו את ρ_0 לפי 3 וממנו חילצנו בעזרת נוסחא 2 את המוביליות של החורים

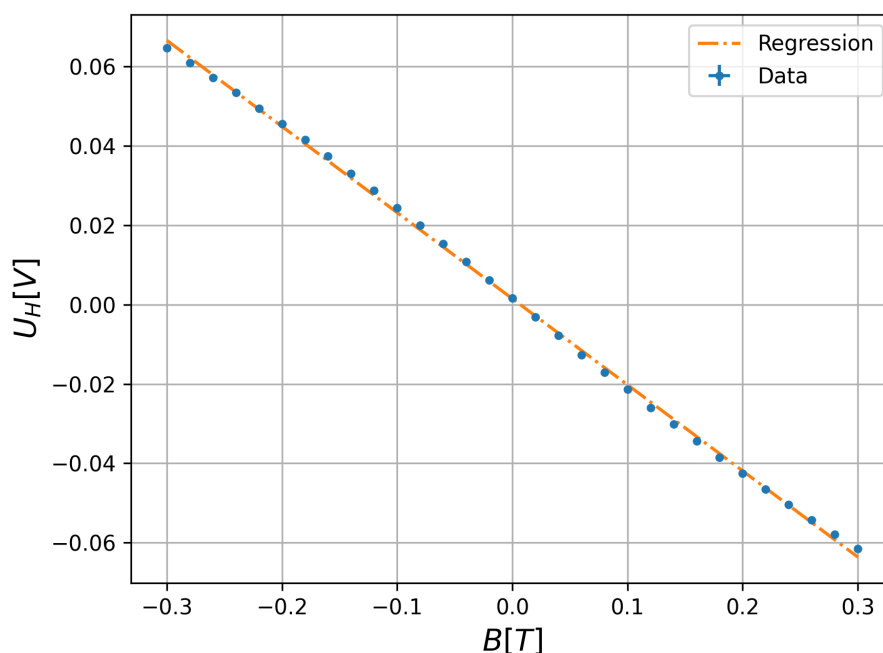
$$\mu_h^{(1)} = 0.229 \pm 0.005 \frac{m^2}{V \cdot sec}$$

חלק 2: מדידה של המתח הול U_H כפונקציה של השדה המגנטי

בחלק זה קבענו את הזרם I_p ל $30 \pm 1 mA$ ואת הזרם העובר בסלילים המגנטיים לאפס. כילנו את המערכת כך שמולטימטר יציג 0 עבור מדידה של U_H .

כעת מדדנו את מתח הול עבור ערכים שונים של השדה המגנטי בתחום $\pm 300 mT$.

התקבלו התוצאות הבאות:



גרף 3: מתח הול (U_H) כפונקציה של השדה המגנטי (B)

ציר ה- x מייצג את השדה המגנטי B בציר T וציר ה- y את המתח U_H ב- V . הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות שנלקחו והקו הכתום את הרגרסיה שבוצעה לנתונים. קווי השגיאה קטנים מכדי לראותם בגרף.

בדומה לחלק הקודם, ניתן לראות כי באופן איכותי כי בקירוב טוב הגרף לינארי כפי שמוצג על פי נוסחא 1. לגרף בוצעה רגרסיה לינארית והתקבלה הפונקציה

$$y = (-0.217 \pm 0.003)x + (0.0015 \pm 0.0004)$$

עם התאמה של $R^2 = 0.9992$. על פי נוסחא 1 ונתוני המערכת חולץ קבוע הול והתקבל

$$R_H^{(2)} = 0.0072 \pm 0.0003 \frac{m^3}{C}$$

כפי שניתן לראות יש חפיפה אם הערך שהתקבל במדידה מהמדידה הקודמת. מתוך הקשר 1 חולצה צפיפות רוב המטענים (החיובים) והתקבלה התוצאה:

$$p^{(2)} = (8.6 \pm 0.3) 10^{20} m^{-3}$$

כפי שניתן לראות יש חפיפה בין התחומים שהתקבלו במדידה הזו ובמדידה הקודמת.

בעזרת ρ_0 חילצנו לפי נוסחא 2 את המוביליות של החורים

$$\mu_h^{(2)} = 0.217 \pm 0.008 \frac{m^2}{V \cdot sec}$$

כפי שניתן לראות יש חפיפה בין התחומים שהתקבלו במדידה הזו ובמדידה הקודמת.

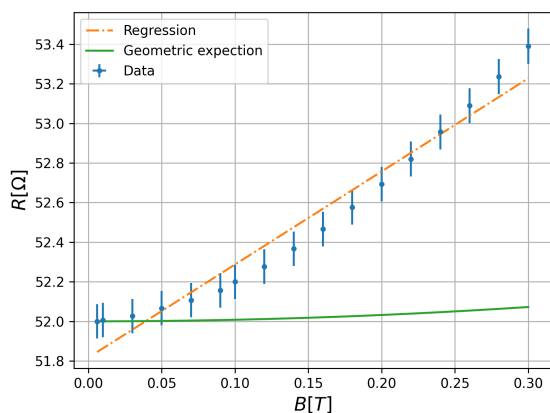
חלק 3: מדידה של ההתנגדות R כפונקציה של השדה המגנטי

חיברנו את המולטימטר במקביל ל U_p , קבענו את הזרם I_p ל $30 \pm 1mA$ ואת הזרם העובר בסלילים המגנטיים לאפס.

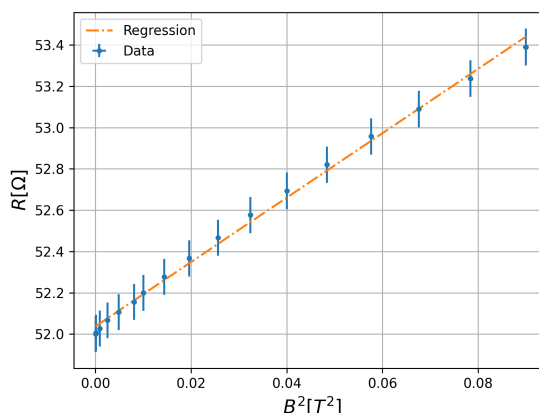
קעת מדדנו את המתח U_p עבור ערכים שונים של השדה המגנטי בתחום $[0, 300] mT$.

בעזרת הזרם והמתח חישבנו דרך חוק אוהם את ההתנגדות כפונקציה של השדה המגנטי הנמדד וכפונקציה של השדה המגנטי בריבוע.

התקבלו התוצאות הבאות:



מה גרף הרגרסיה מסמל ?



גרף 4-5 (משמאל לימין): התנגדות המל"מ כפונקציה של השדה המגנטי B וריבוע השדה המגנטי B^2

ציר ה- x מייצג את השדה המגנטי B בגרף 1 ובגרף 2 את השדה בריבוע B^2 ב- T^2 . ציר ה- y את המתח ההתנגדות ב- Ω . הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות שנלקחו והקו הכתום את הרגרסיה שבוצעה לנתונים. כמו כן עבור גרף 4 סרטטנו בקו ירוק את התחזית של השינוי בהתנגדות מהאפקט הגאומטרי לפי נוסחא 5 והנתונים שחולצו במהלך הניסוי.

עבור גרף 4, ניתן לראות איכותית כי ההתאמה הלינארית לא טובה מאוד. מתוך הרגרסיה התקבלה הפונקציה

$$y = (4.7 \pm 0.5)x + (51.82 \pm 0.09)$$

עם התאמה של $R^2 = 0.95526$ אשר מעיד באופן כמותי על כך שההתאמה אינה טובה. עבור גרף 2, ניתן לראות איכותית כי ההתאמה הלינארית טובה יותר. מתוך הרגרסיה התקבלה הפונקציה

$$y = (15.6 \pm 0.5)x + (52.04 \pm 0.02)$$

כך לא רושמים תוצאות רגרסיה.

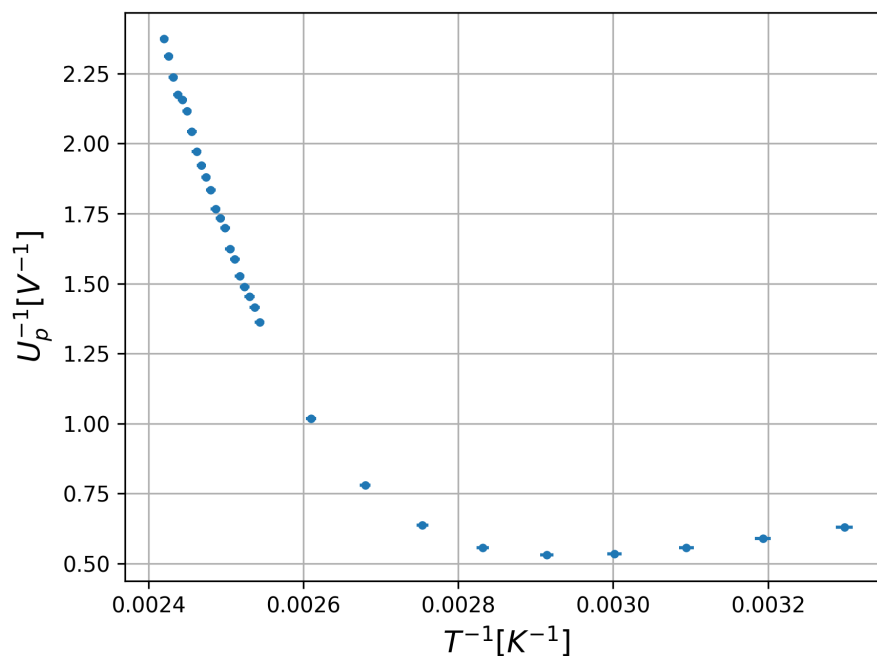
עם התאמה של $R^2 = 0.9965$ אשר מעיד באופן כמותי כי אכן ההתאמה יותר מוצלחת. כפי שצינו ניתן לראות שההתנגדות מתנהגת בקירוב טוב באופן לינארי לריבוע השדה בהתאם לנוסחא 4. בנוסף לפי הביטוי עבור האופקט הגאומטרי 5 נחשב את ההשפעה התיאורטית, ניתן לראות בגרף 4 כי היא זניחה לעומת השינוי בהתנגדות.

חלק 4: מדידה של המתח U_p כפונקציה של הטמפ'

כיוונו את הזרם ל $30 \pm 1 \text{ mA}$ ואת השדה המגנטי לאפס, חיברנו את המולטימטר במקביל ל U_p וכיוונו את הצוגה להציג את הטמפ' של המערכת.

חיממנו את המערכת עד $141^\circ \pm 1^\circ$ צלזיוס וצילמנו את המערכת בזמן שהיא התקררה לטמפ' החדר. מתוך הצילומים חילצנו את מדידות הטמפ' והמתח.

נציג את התוצאות כגרף של U_p^{-1} כפונקציה של T^{-1} :



גרף 6: U_p^{-1} כפונקציה של T^{-1}

ציר ה- x מייצג את אחד חלקי טמפר' המערכת ב- K^{-1} וציר ה- y את אחד חלקי המתח הנדגם ב- V^{-1} . הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות שנלקחו.

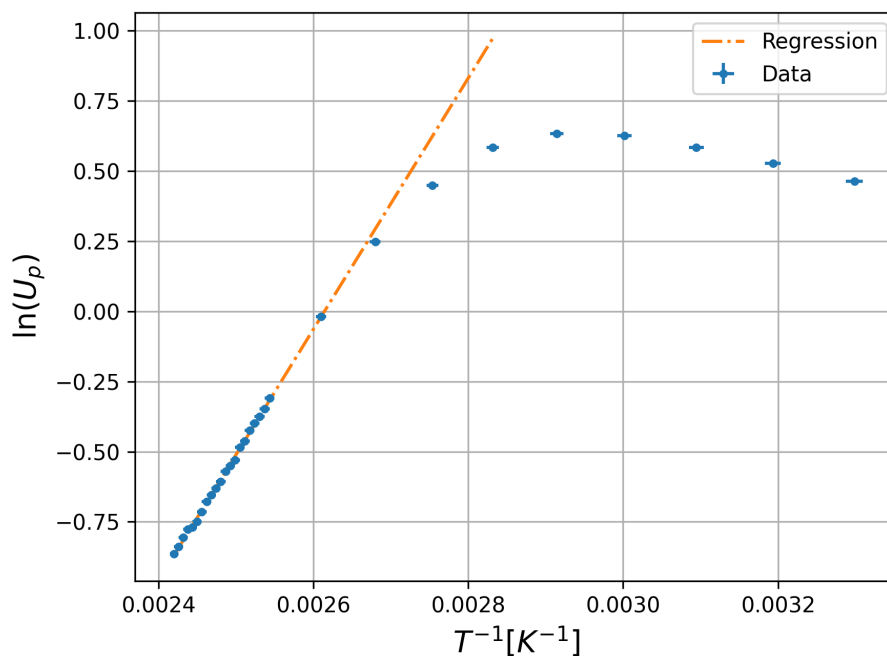
בחלקו השמאלי של הגרף המתייחס לטמפר' גבוהות ניתן לראות כי הגרף בקירוב טוב לינארי ניתן להבין זאת באופן הבא: הטמפר' גבוהות ולכן המל"מ נמצא במשטר האינטרינזי, לכן נעזר בנוסחא 6 (בביטוי לפני ביצוע הln), בטמפר' אלו מתקיים $T^{-1} \ll 1$ ולכן ניתן לקרב את האקספוננט לפונקציה לינארית (קירוב טיילור מסדר ראשון) ולקבל

$$U_p^{-1} \sim 1 - \frac{E_g}{2k_B} \cdot T^{-1}$$

והרי שקיבלנו שבטמפר' גבוהות אכן אמור להתקיים יחס לינארי מקורב בין U_p^{-1} לבין T^{-1} .

כדי לחלץ את האנרגיה E_g נציג את לוג המתח כפונקציה של T^{-1} במקרה זה נעזר בחלק השני של הנוסחא 6 (לאחר ביצוע הln).

בהצגה של התוצאות כ- $\ln U_p$ כפונקציה של T^{-1} התקבל הגרף הבא:



גרף 7: $\ln U_p$ כפונקציה של T^{-1}

ציר ה- x מייצג את אחד חלקי טמפ' המערכת ב- K^{-1} וציר ה- y את לן המתח הנדגם. הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות שנלקחו והקו הכתום את הרגרסיה שבוצעה לנתונים בתחום הלינארי. ביצענו רגרסיה לינארית על התחום הלינארי (טמפ' גבוהות) והתקבלה הפונקציה הבא:

$$y = (4.48 \pm 0.09) 10^3 x + (-11.7 \pm 0.3)$$

אין טעם בנתונים הגולמיים של רגרסיה.

איך הוערכו השגיאות

עם התאמה טובה של $R^2 = 0.9982$. מתוך השיפוע נחלץ את האנרגיה

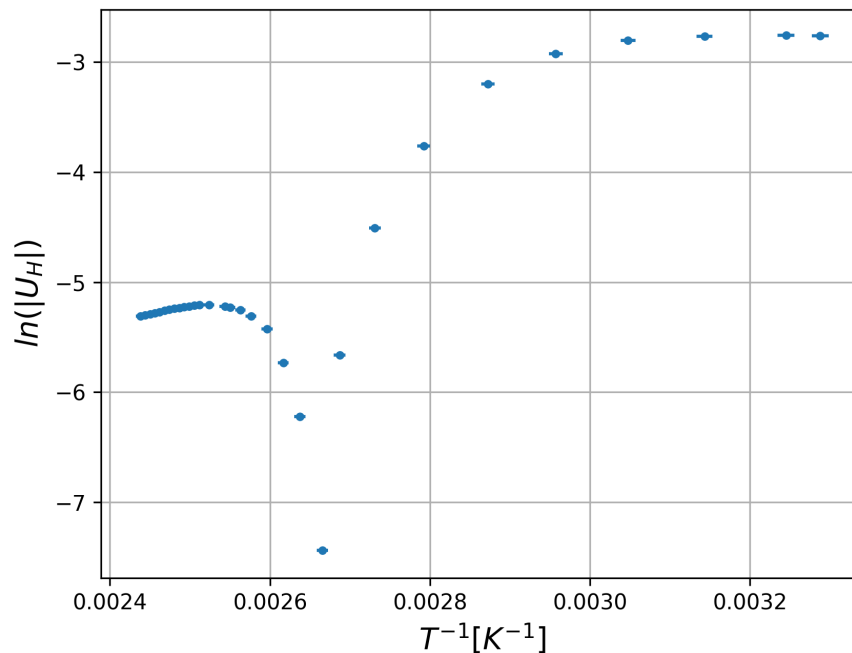
$$m = \frac{E_g}{2k_B} \Rightarrow E_g = 2mk_B$$

ונקבל

$$E_g = 0.77 \pm 0.02 \text{ eV}$$

חלק 5: מדידה של מתח הול U_H כפונקציה של הטמפ'

חיברנו את המולטימטר במקביל למתח הול U_H וכילנו אותו להיות אפס כאשר הזרם במערכת מתאפס. קבענו את הזרם $I_p = 30 \pm 1 \text{ mA}$ ואת השדה המגנטי ל $300 \pm 1 \text{ mT}$ ולבסוף חיממנו את המערכת עד כ 140° צלזיוס. במהלך ההתקררות של המערכת לטמפ' החדר צילמנו את המערכת ומכשירי המדידה ולאחר מכן חילצנו מהם את מדידות הטמפ' ומתח הול. כפי שנחזה מהתדריך לפי נוסחא 4 R_H מחליף סימן ומכאן ש U_H מחליף סימן, לכן חישבנו את $\ln|U_H|$ כפונקציה של T^{-1} , התקבלו התוצאות הבאות:

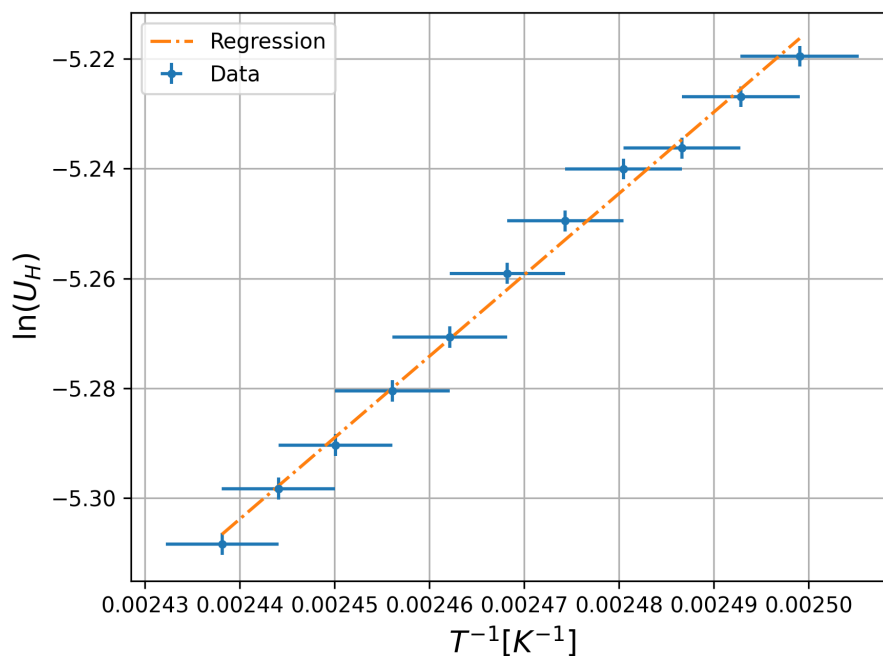


גרף 8: $\ln|U_H|$ כפונקציה של T^{-1}

ציר ה x מייצג את אחד חלקי טמפ' המערכת ב K^{-1} וציר ה y את לן המתח הנדגם (בערך מוחלט). הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות.

כמו בחלק 4, עבור הטמפ' הגבוהות נעזר בנוסחא 6 ונזהה קשר לינארי בין $\ln(U_H)$ ל T^{-1} .

נזהה את התחום הלינארי עבור הטמפ' הגבוהות ונבצע עליו רגרסיה לינארית, התקבל הגרף הבא (טמפ' $140^\circ - 120^\circ$):



גרף 9: $\ln |U_H|$ כפונקציה של T^{-1}

ציר ה- x מייצג את אחד חלקי טמפר' המערכת ב- K^{-1} וציר ה- y את \ln הממתח הנדגם (בערך מוחלט). הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות והקו הכתום את הרגרסיה. ביצענו רגרסיה לינארית על התחום הלינארי (טמפר' גבוהות) והתקבלה הפונקציה הבא:

$$y = (1.48 \pm 0.08) \cdot 10^3 x + (-8.9 \pm 0.2)$$

עם התאמה של $R^2 = 0.9939$. מתוך השיפוע נחלץ את האנרגיה

$$m = \frac{E_g}{2k_B} \Rightarrow E_g = 2mk_B$$

ונקבל

$$E_g = 0.26 \pm 0.02 eV$$

נשים לב שערך זה הוא כשליש מהערך הקודם שחישבנו עבור האנרגיה, נדון בפער זה בדיון.

דיון בתוצאות

חלק 0

בחלק 0 הוסקה ההתנגדות הדגם לפי חוק אוהם על ידי מדידה של מתח כתלות בזרם וקיבלנו $R_0 = 53.3 \pm 0.9 \Omega$. אומנם אין לנו ערך להשוות אליו אך ההתאמה לקשר הלינארי בין המתח לזרם הייתה טובה עם $R^2 = 0.9992$ לכן אנו מניחים לפי קריטריון זה שמדידה זו הייתה מוצלחת.

איך הוערכו השגיות?

חלקים 1 ו 2

בחלקים 1 ו 2 מצאנו את סוג נושאי המטען, המוביליות שלהם וצפיפותם בשתי דרכים שונות.

בחלק 1, מרגרסיה לינארית של מדידות U_H כתלות ב I_p הוסק ממשוואה 1 קבוע הול $R_H^{(1)} = 0.0076 \pm 0.0002 \frac{m^3}{C}$ (שגיאה יחסית של כ-2%), שנושאי המטען הם חיוביים והמל"מ הוא מסוג P , שצפיפות המטענים $p^{(1)} = (8.2 \pm 0.2) 10^{20} m^{-3}$ (שגיאה יחסית של כ-2.5%) והמוביליות שלהם היא $\mu_h^{(1)} = 0.229 \pm 0.005 \frac{m^2}{V \cdot sec}$ (שגיאה יחסית של כ-2%).

בחלק 2, מרגרסיה לינארית של מדידות U_H כתלות ב B הוסק מנוסחא 1 קבוע הול $R_H^{(2)} = 0.0072 \pm 0.0003 \frac{m^3}{C}$ (שגיאה יחסית של כ-4%), שנושאי המטען הם חיוביים והמל"מ הוא מסוג P , שצפיפות המטענים היא $p^{(2)} = (8.6 \pm 0.3) 10^{20} m^{-3}$ (שגיאה יחסית של כ-3.5%) והמוביליות שלהם היא $\mu_h^{(2)} = 0.217 \pm 0.008 \frac{m^2}{V \cdot sec}$ (שגיאה יחסית של כ-3.7%).

ניתן לראות שישנה הסכמה בין התוצאות של שתי דרכי המדידה שכן $R_H^{(1)}$ ו $R_H^{(2)}$ חופפים בחלק מתחומי השגיאה שלהם. כך גם עבור הצפיפויות $p^{(1)}$ ו $p^{(2)}$. עבור המוביליות $\mu_h^{(1)}$ ו $\mu_h^{(2)}$ התקבלה חפיפה מסוימת בין תחומי השגיאה של הערכים. ואומנם הערכים המקובלים בספרות [3] של המוביליות לא מוכלים בתחומי השגיאה של המדידות של שני החלקים, כש $\mu_{h,literature} = 0.19 \frac{m^2}{Vs}$. כיוון שישנה התאמה בשתי המדידות שונות, אנו מניחים שפער זה נובע משגיאה שיטתית שלא שמנו לב אליה במהלך המדידות וגורמת להזחה קבועה. על מנת לאשש השארה זו יש לחזור על המדידות בזהירות.

חלק 3

בחלק 3 מדדנו את ההתנגדות במל"מ כפונקציה של השדה המגנטי המופעל עליו. בדקנו השפעה של שתי תופעות של השינוי בהתנגדות עקב השדה המגנטי - הופעה של שני סוגי נושאי מטען ואפקט שנובע מהגאומטריה של המל"מ. מצאנו שיש התאמה טובה של הגרף ($R^2 = 0.9965$) לפונקציה לינארית בריבוע השדה, כפי שצפוי מנוסחא 4 אשר מתחשבת באפקט של שני סוגי נושאי מטען. בנוסף, חשיבנו את האפקט הגאומטרי התיאורטי בעזרת גדלים שנמצאו במהלך הניסוי וגדלים מקובלים בספרות [3] וקיבלנו שהוא זניח לעומת ההתנגדות שהתקבלה. משתי הסיבות הללו קבענו שהאפקט הראשון (שני סוגי נושאי מטען) הינו האפקט הדומיננטי בהשפעת השדה המגנטי על ההתנגדות (בתנאים הנ"ל).

חלק 4

בחלק 4 מדדנו את המתח U_p כפונקציה של הטמפרטורה, ראינו שבטמפרטורות גבוהות יש קשר לינארי בין T^{-1} לבין U_p^{-1} כפי שהיילן מצפים מהתאוריה של מל"מ אינטרינזי. בנוסף בעזרת נוסחא 6 חילצנו את פער האנרגיה בין פסי ההולכה של המל"מ וקיבלנו $E_g = 0.77 \pm 0.02 eV$ כאשר השגיאה היחסית היא 2.6% מהערך הנמדד. על פי הספרות [2] ערך פער האנרגיה משתנה כתלות בטמפרטורה, בטווח הטמפרטורה בו חישבנו את האנרגיה ($120^\circ - 140^\circ C$) על פי הספרות מתקיים:

$$E_g^{theory} \in (0.745, 0.756) eV$$

כלומר אכן יש חפיפה עם הערך התיאורטי.

חלק 5

בחלק 5 ביצענו מדידה דומה עבור U_H כפונקציה של הטמפרטורה. ראינו שמתח הול החליף סימן במהלך שינוי הטמפרטורה בהלימה עם נוסחא 4 עבור מל"מ $p - type$. בדומה לחלק 4 הבחנו שעבור טמפרטורות גבוהות יש התנהגות של מל"מ אינטרנזי ולכן יש התנהגות לינארית וממנה בוצע ניסיון לחלץ את פער האנרגיה. התקבל $E_g = 0.26 \pm 0.02 eV$ עם שגיאה יחסית של 7.8%, תוצאה זו רחוקה משמעותית (לא בטווח השגיאה) מן תוצאת המדידה הקודמת ומהתוצאה התיאורטית ועל כן נסיק שאין אפשרות לבצע מדידת פער האנרגיה בדרך זו ממל"מ $p - type$.

מסקנות

בחלקים מסוימים בניסוי קיבלנו תוצאות המתיישבות עם הציפייה עקב התיאוריה בעוד שבחלקים אחרים היו פערים. בחלקים 1 ו-2 הקשרים שציפינו שיהיו לינארים אכן היו בהתאמה טובה מאוד לינארים עם ערכי R^2 המקיימים $R^2 > 0.99$. בנוסף, הערכים שהתקבלו בשני החלקים חופפים אחד לשני בתחומי השגיאה שלהם כשהשגיאות היחסיות של הגדלים שהוסקו היו קטנים מ-5%. ואומנם ערך המוביליות שאליו השווינו את הערכים שהתקבלו לא תואם לערכים שקיבלנו. הנחנו שפער זה התקבל בגלל שגיאה שיטתית הקשורה למערכת, כדי לאשש הנחה זו היינו מחפשים דרכים נוספות למצוא את המוביליות של החורים באותה מערכת ניסוי ולראות אם התוצאות עומדת בקנה אחד עם התוצאות של שני החלקים או דווקא לערך מהספרות.

בחלק 3, קיבלנו שהתלות של התנגדות הדגם בשדה המגנטי הפועל עליו היא ריבועית בהתאמה טובה עם $R^2 = 0.9965$. כשרצינו לבדוק אילו מבין האפקטים התורמים למגנטורסיסטנס הם משמעותיים יותר במערכת שלנו קיבלנו שהאפקט הגיאומטרי זניח לעומת האפקט עקב קיום של שני סוגי נושאי מטען.

בחלקים 4 ו-5 כחיפשנו את פער האנרגיה ראינו שבחלק 4 ערך פער האנרגיה E_g שהתקבל מכיל בתחום השגיאה שלו את תחום הערך המקובל בספרות ואומנם הערך שחולץ מהמדידות בחלק 5 היה רחוק מהערך המקובל והערך שהתקבל בחלק הקודם. אומנם שתי המדידות בוצעו בדרכים דומות, כששתיהן איפשרו לקיחת מדידות מרובות ולא נתנו הרבה מקום לשגיאה אנושית בלקיחת המדידות על ידי שימוש במצלמה שמתעדת מדידות לאורך זמן. אך יתכן והשיטה דרכה חולץ E_g בחלק 5 מניחה הנחות שגויות. כדי להעריך בכל זאת את פער האנרגיה במדידה זו יש להגיע להבנה טובה יותר של התיאוריה ולמצוא היכן הקירובים שהשתמשנו בהם קורסים וכיצד ניתן לשפר אותם.

בסך הכל כמסקנה כללית מהניסוי נראה שאפקט הול אכן מתקיים ומערכת הניסוי והשיטה בה הוא נערך מאפשרת לחזות ממנו תכונות של המל"מ, אך בחלקים מסוימים (בעיקר 5) יתכן ונדרשת זהירות בקירובים ובהנחות עליהן אנו מסתמכים.

מקורות מידע

- (1) תדריך אפקט הול.
- (2) Y. P. VARSHNI.(1967). TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ENERGY GAP IN SEMICONDUCTORS:Physica,34 (149-154)
- (3) Jensen, H.H. (1972). Geometrical effects in measurments of magnetoresisance. Journal of Physics C: Solid State Physics, 2867.

נספח

- הנוסחא בה השתמשנו לחישוב השגיאות הנגררות בניסוי:

$$\delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots}$$

כאשר $\delta x, \delta y, \dots$ הן השגיאות של x, y, \dots ו- δF היא השגיאה הנגררת של F , שהיא פונקציה של המשתנים x, y, \dots .

- הנוסחה בה השתמשנו לחישוב השגיאה היחסית בין הערכים המדודים לתיאורטיים בניסוי:

$$\xi_{rel \ err} = \frac{\delta v}{v} \cdot 100\%$$