כותרת

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 12, 2023

תקציר

מבוא

תוצאות הניסוי

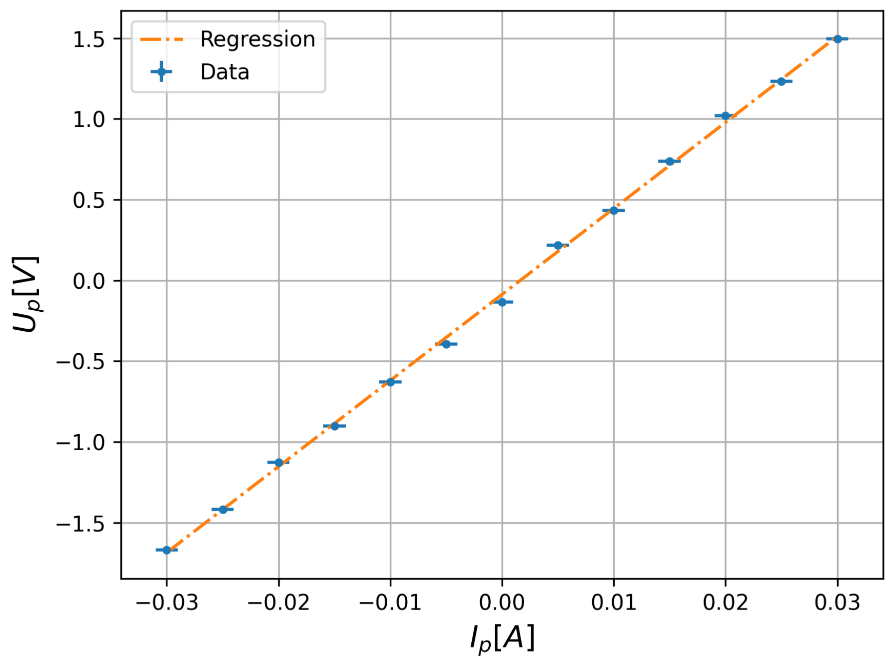
__לבדוק כתיבת שגיאות__.

חיברנו את המערכת כפי שמצוין בסרטוט (?).

<u>חלק 0: מדידה של המתח U_p כפונקציה של הזרם I_p</u>

הסרנט את החלק המודד את השדה המגנטי וחיברנו את המולטימטר במקביל למתח U_p. ביצענו דגימות של מתח זה עבור זרמים I_p בין בתחום $\pm30mA$.

התקבלו התוצאות הבאות:



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

ציר הx מייצג את הזרם I_p בA וציר הy את המתח U_p בV. 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

$$y = (53.3 \pm 0.9)\,x + (-0.087 \pm 0.016)$$

עם התאמה של $R^2 = 0.9992$.

על פי חוק אוהם חילצנו את ההתנגדות

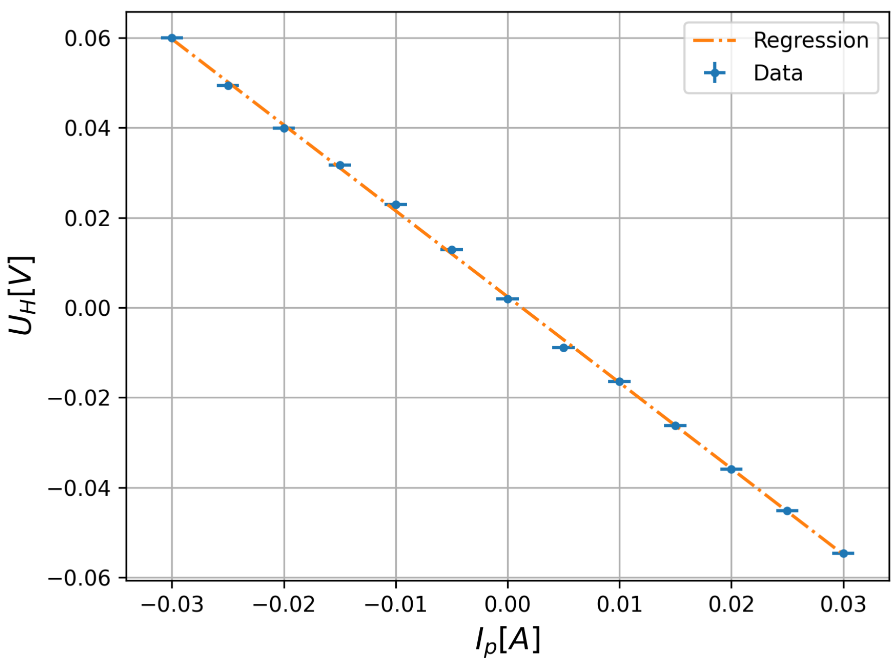
$$R_0 = 53.3 \pm 0.8\Omega$$

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

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

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

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



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

ציר הx מייצג את הזרם I_p בA וציר הy את המתח U_H בV. הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות שנלקחו והקו הכתום את הרגרסיה שבוצעה לנתונים.

ניתן לראות כי באופן איכותי כי בקירוב טוב הגרף ליניארי כפי שמוצפה על פי נוסחה (?). לגרף בוצעה רגרסיה לניארית

והתקבלה הפונקציה

$$y = (-1.910 \pm 0.025)\, x + (0.0024 + / - 0.0005)$$

עם התאמה של $R^2 = 0.9995$. על פי נוסחה (?) ונתוני המערכת חולץ קבוע הול והתקבל

$$R_H^{(1)} = -0.00761 \pm 0.00011 \frac{m^3}{C}$$

(האם צריך להסיר את המטען)

מהדרך שבו נבנתה המערכת, מדידת מתח שלילי (וכתוצאה מכך R_H שלילי) מעיד על הצטברות מטענים חיובים (חורים) בחלקו התחתון של המל"מ (או מטענים שלילים בחלקו העליון) אך על פי כיוון השדה המגנטי וכיוון הזרם נסיק שהאפשרות היחידה היא שאלו מטענים חיובים בתחתית המל"מ, כלומר המל"מ הוא $P\ Type$. בדיקה של הלוח אכן אשרה שזהו המצב. מתוך הקשר (?) חולצה צפיפות רוב המטענים (החיובים) והתקבלה התוצאה:

$$n^{(1)} = (8.21 \pm 0.11)\, 10^{20} m^{-3}$$

בעזרת R_0 שחישבנו בחלק 0 חילצנו לפי נוסחה (?) את המוביליוט של החורים

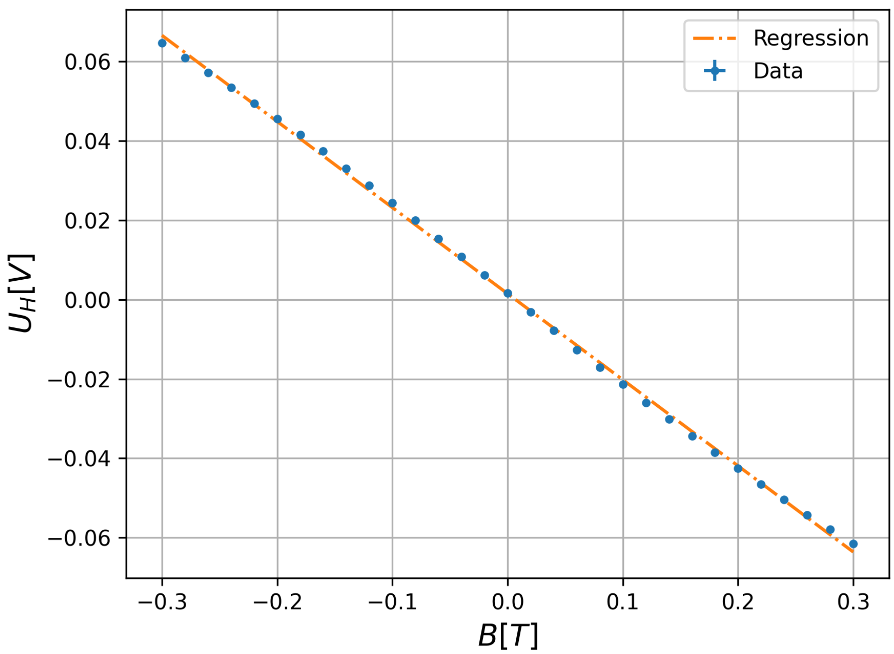
$$\mu^{(1)} = 0.229 \pm 0.005 \frac{m^2}{\Omega C}$$

<u>חלק 2: מדידה של המתח הול U_H כפונקציה של השדה המגנטי</u>

בחלק זה קבענו את הזרם I_p ל$30 \pm 1mA$ 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 $\pm 300mT$.

התקבלו התוצאות הבאות:



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

ציר הx מייצג את השדה המגנטי B בT וציר הy את המתח U_H בV. 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 שמוצפה על פי נוסחה (?). לגרף בוצעה רגרסיה לניארית והתקבלה הפונקציה

$$y = (-0.2170 + / - 0.0022)\, x + (0.0015 + / - 0.0004)$$

עם התאמה של $R^2 = 0.9992$. על פי נוסחה (?) ונתוני המערכת חולץ קבוע הול והתקבל

$$R_H^{(2)} = -0.00723 + / - 0.0003 \frac{m^3}{C}$$

(האם צריך להסיר את המטען?)

כפי שניתן לראות יש חפיפה אם הערך שהתקבל במדידה מהמדידה הקודמת.

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

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

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

בעזרת R_0 שחישבנו בחלק 0 חילצנו לפי נוסחה (?) את המוביליטי של החורים

$$\mu^{(2)} = 0.217 \pm 0.008 \frac{m^2}{\Omega C}$$

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

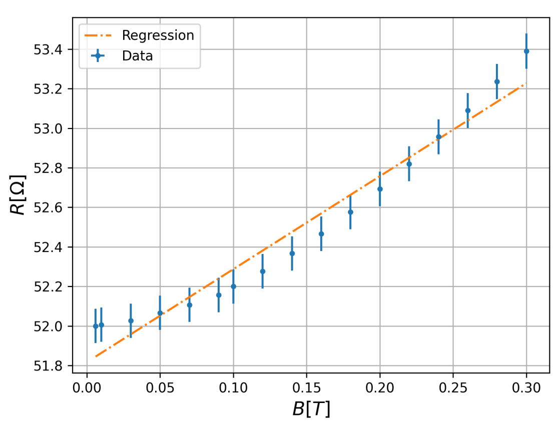
<u>חלק 3: מדידה של ההתנגדות R כפונקציה של השדה המגנטי</u>

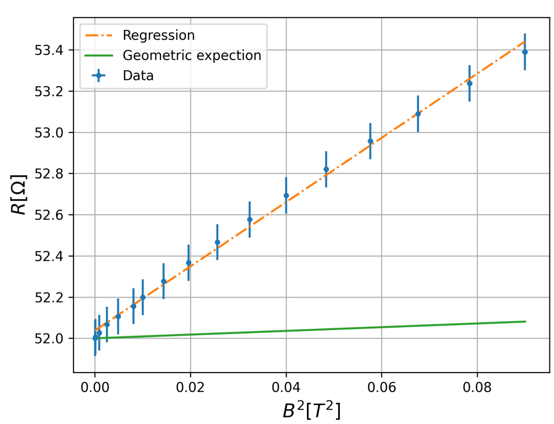
חיברנו את המולטימטר במקביל ל-U_p, קבענו את הזרם I_p ל-$30 \pm 1mA$ ואת הזרם העובר בסלילים המגנטיים לאפס.

כעת 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:





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

ציר הx מייצג את השדה המגנטי B בT בגרף 1 ובגרף 2 את השדה בריבוע B^2 בT^2. ציר הy את המתח ההתנגדות בΩ.
הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות שנלקחו והקו הכתום את הרגרסיה שבוצעה לנתונים.
כמו כן עבור גרף 5 סרטטנו בקו ירוק את התחזית של השינוי בהתנגדות מהאפקט הגאומטרי לפי נוסחה (?) והנתונים שחולצו במהלך הניסוי.

עבור גרף 1, 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

$$y = (15.6 \pm 0.5)\,x + (52.037 \pm 0.019)$$

עם התאמה של $R^2 = 0.9965$ אשר מעיד באופן כמותי כי אכן ההתאמה יותר מוצלחת.

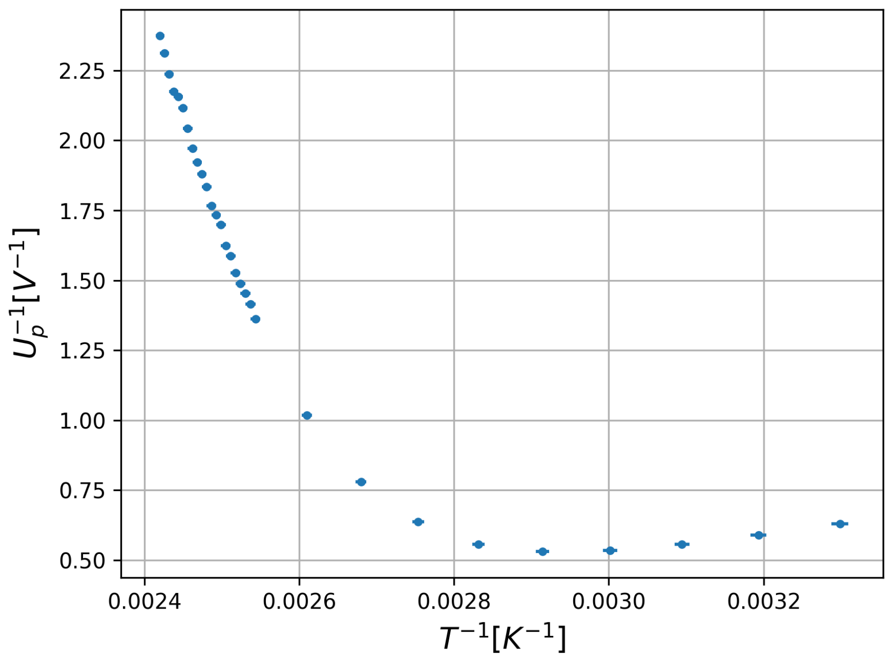
__לוודא את המסקנה הבאה__

כפי שציינו ניתן לראות שההתנגדות מתנהגת בקירוב טוב באופן לינארי לריבוע השדה בהתאם לנוסחה (?) ואילו האפקט הנובע מהגאומטריה של הבעיה זניח אינו מתאים וזניח לעומתו.

_האם צריך לעשות עוד משהו?__

<u>חלק 4: מדידה של המתח U_p כפונקציה של הטמפ'</u>

כיוונו את הזרם ל$30 \pm 1mA$ ואת השדה המגנטי לאפס, חיברנו את המולטימטר במקביל לU_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 הx מייצג את אחד חלקי טמפ' המערכת בK^{-1} וציר הy את אחד חלקי המתח הנדגם בV^{-1}. הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות שנלקחו.

להסביר את החלק הימני של הגרף

להעביר את הפיתוחים הבאים למבוא

בחלקו השמאלי של הגרף המתייחס לטמפ' גבוהות ניתן לראות כי הגרף בקירוב טוב לינארי ניתן להבין זאת באופן הבא: הטמפ' גבוהות ולכן המל"מ נמצא במשטר האינטרינזי, במשטר זה מתקיים

$$n = p = n_i \sim e^{-\frac{E_g}{2k_BT}}$$

כמו כן

$$U_p = \frac{\rho_{xx}L}{Wd}I_x, \rho_{xx} = \frac{1}{e\left(n\mu_e + \mu_h p\right)} = \frac{1}{n_i e\left(\mu_e + \mu_h\right)}$$

$$\Rightarrow U_p^{-1} \sim n_i \sim e^{-\frac{E_g}{2k_BT}}$$

בנוסף, בטמפ' אלו מתקיים $T^{-1} << 1$ ולכן ניתן לקרב את האקספוננט לפונקציה לינארית ולקבל

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

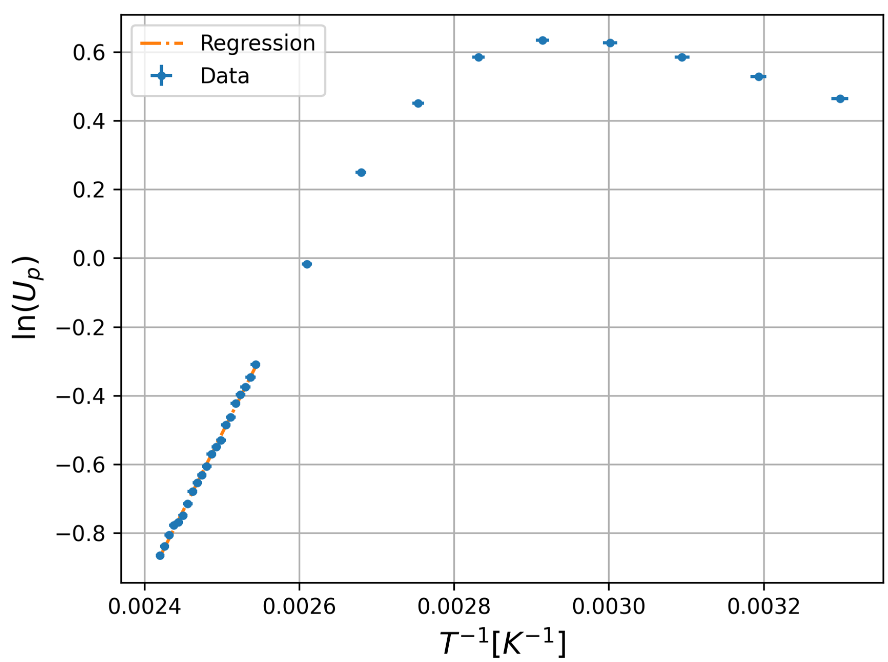
והרי שקיבלנו שבטמפ' גבוהות אכן אמור להתקיים יחס לינארי מקורב בין U_p^{-1} לבין T^{-1}.

כדי לחלץ את האנרגיה E_g נציג את לוג המתח כפונקציה של T^{-1} במקרה זה ניתן לכתוב

$$U_p = Ke^{\frac{E_g}{2k_B T}} \Rightarrow \ln U_p = \frac{E_g}{2k_B} T^{-1} + \ln K$$

כאשר K קבוע כלשהו.

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



גרף 7: $\ln U_p$ כפונקציה של T^{-1}

ציר הx מייצג את אחד חלקי טמפ' המערכת בK^{-1} וציר הy 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 הבאה:

$$y = (4.48 \pm 0.09)\, 10^3 x + (-11.71 \pm 0.21)$$

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

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

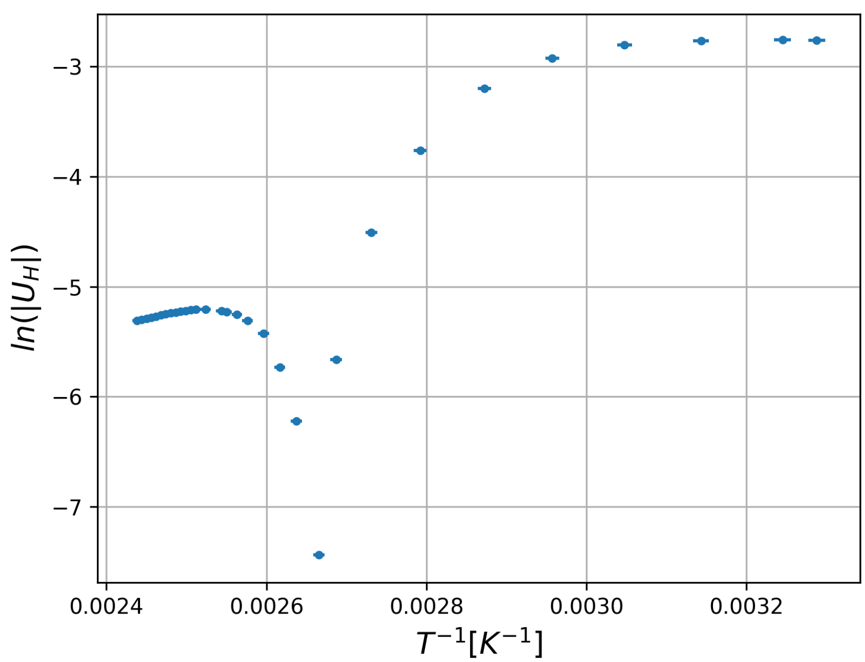
ונקבל

$$E_g = 0.77 \pm 0.02eV$$

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 $I_p = 30 \pm 1mA$ ואת השדה המגנטי ל$300 \pm 1mT$ 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 נוסחה (?) R_H מחליף סימן ומכאן שU_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 הx מייצג את אחד חלקי טמפ' המערכת בK^{-1} וציר הy את לן המתח הנדגם (בערך מוחלט). הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות .

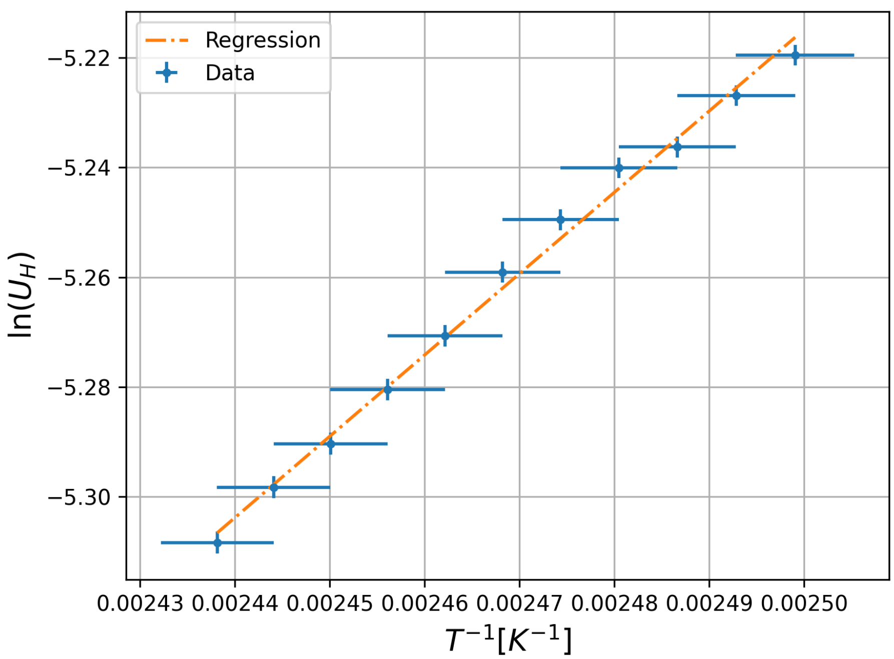
בטמפ' גבוהות כאשר המל"מ בתחום האינטרינזי מתקיים

$$U_H \sim \frac{1}{n_i} \sim e^{\frac{E_g}{2k_BT}}$$

ולכן

$$\ln U_H = K + \frac{E_g}{2k_B}T^{-1}$$

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



גרף 9: $\ln|U_H|$ כפונקציה של T^{-1}

ציר הx מייצג את אחד חלקי טמפ' המערכת בK^{-1} וציר הy את לן המתח הנדגם (בערך מוחלט). הנקודות הכחולות מייצגות את הדגימות והקו הכתום את הרגרסיה.

ביצענו רגרסיה לינארית על התחום הלינארי (טמפ' גבוהות) והתקבלה הפונקציה הבאה:

$$y = (1.48 \pm 0.08) \cdot 10^3 x + (-8.92 \pm 0.19)$$

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

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

ונקבל

$$E_g = 0.256 \pm 0.013eV$$

דיון בתוצאות

מסקנות

מקורות מידע

1) תדריך ___.

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:

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