



Ben-Gurion University of the Negev
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

דוח מעבדה: מוליכות-על

מגישים:

לב ארמן ת.ז. 314371675

ולדי פנקרושין ת.ז. 320688914

מדריך:

מר ציון חזן

מנחה אקדמי:

ד"ר ישי מנסין

תאריך 31/7/22

תוכן עניינים

1.	מבוא ותיאוריה.....	3
1.1.	מוליכות-על.....	3
1.2.	אפקט מייזנר.....	4
1.3.	מוליך על לעומת מוליך אידיאלי.....	4
1.4.	גינזבורג-לנדאו.....	6
1.5.	תיאוריית BCS וזוגות קופר.....	7
1.6.	אפקט ג'וזפסון.....	8
1.7.	SQUID – Superconducting Quantum Interference Device.....	9
1.8.	מוליכות-על בטמפרטורות גבוהות – YBCO ו-BSCCO.....	9
1.9.	נוסחאות נוספות.....	10
2.	ניסוי מספר 1 – מתח כתלות בזרם במערכת SQUID.....	11
2.1.	מטרות הניסוי.....	11
2.2.	תיאור המערכת.....	11
2.3.	מהלך הניסוי.....	11
2.4.	תוצאות הניסוי.....	11
2.5.	עיבוד תוצאות.....	13
2.6.	דיון בתוצאות ומסקנות.....	14
3.	ניסוי מספר 2 – מתח כתלות בשטף מגנטי במערכת SQUID.....	15
3.1.	מטרות הניסוי.....	15
3.2.	תיאור המערכת.....	15
3.3.	מהלך הניסוי.....	15
3.4.	תוצאות הניסוי.....	15
3.5.	עיבוד תוצאות.....	18
3.6.	דיון בתוצאות ומסקנות.....	22
4.	ניסוי מספר 3 – YBCO.....	23
4.1.	מטרות הניסוי.....	23
4.2.	תיאור המערכת.....	23

25	4.3 מהלך הניסוי.....
26	4.4 תוצאות הניסוי
27	4.5 עיבוד תוצאות.....
29	4.6 דיון בתוצאות ומסקנות.....
31	5. ניסוי הרחבה - BSCCO
31	5.1 מטרות הניסוי
31	5.2 תיאור המערכת
31	5.3 מהלך הניסוי.....
31	5.4 תוצאות הניסוי
32	5.5 עיבוד תוצאות.....
32	5.6 דיון בתוצאות ומסקנות.....
33	6. סיכום ומסקנות
33	7. הצעות לשיפור הניסוי.....
34	8. רשימת מקורות

1. מבוא ותיאוריה

1.1. מוליכות-על

היום בעידן המודרני, כל תחום בחיים שלנו כולל מכשירים חשמליים. מכשירים אלה מורכבים מחומרים מוליכים ברמות שונות, ההבדל ביניהם הוא מוליכות חשמלית וזו תכונה של החומר המהווה אינדקציה ליכולת שלו להעביר זרם חשמלי. מוליכות על זו פאזה של חומר המאפשרת העברה של זרם חשמלי עם התנגדות אפסית. מוליכות על התגלתה ב-1911 בהולנד ע"י מדען בשם קמרלינג אונס כאשר עסק במחקר של ההתנגדות של כספית מוצקה כתלות בטמפרטורה, כאשר המערכת קוררה בעזרת הליום נוזלי בטמפרטורה של $4.2^\circ K$. אונס גילה שבטמפרטורה זו ההתנגדות החשמלית של כספית נעלמת, גילוי זה הוביל לתחום מחקר חדש בו התגלו חומרים נוספים עם התכונה של מוליכות על.

אנחנו יכולים לראות שיש תלות של המוליכות בטמפרטורה לכן קיימת טמפרטורה קריטית בה החומר עובר את השינוי פאזה שלו לפאזה על מוליכה. בנוסף ידוע שבפאזה זו יש גם רגישות לשדה מגנטי, כלומר קיים שדה מגנטי קריטי שיכול להוציא את החומר מהפאזה. מחוק אמפר אנחנו יודעים שהשדה המגנטי פרופורציוני לזרם ולכן הקיום של שדה מגנטי קריטי גורר את הקיום של זרם קריטי.

$$(1) \quad H \propto I \Rightarrow \frac{H_c(T)}{H_c(0)} = \frac{I_c(T)}{I_c(0)} = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2$$

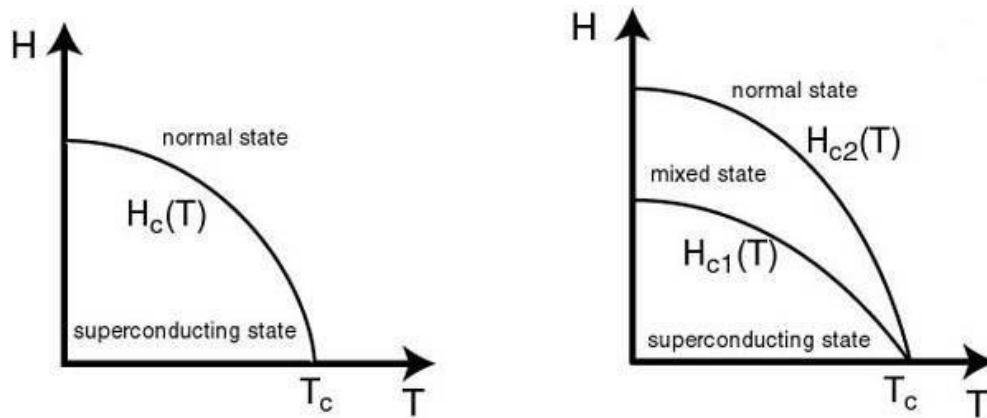
כאשר H_c – זה השדה המגנטי הקריטי, I_c – זרם קריטי, T – טמפרטורה נמדדת, T_c – טמפרטורה קריטית.

מאז הגילוי של מוליכות על היו ניסיונות רבים לנצל תכונה זו, אך הבעיה הייתה שכל החומרים שהתגלו היו מוליכי על בטמפרטורות של עד $20K$, דבר שהקשה על השימוש בהם בגלל שטמפרטורות כאלה הושגו בתנאי מעבדה. עם זאת ב-1986 חוקרים ב-IBM גילו את מה שכיום נקרא מוליכי על בטמפרטורות גבוהות. בעקבות הגילוי הזה, נוצרו שתי קטגוריות של מוליכי על: סוג I וסוג II.

סוג I – נקרא מוליכי על בטמפרטורות נמוכות, לעיתים גם מוליכי על מתכתיים (metallic superconductors). לחומרים מהסוג הזה יש טמפרטורה קריטית מתחת ל $30K$, יש להם שדה קריטי יחיד והמעבר בין פאזה של מוליכות על לפאזה רגילה היא מיידית.

סוג II – נקרא מוליכי על בטמפרטורות גבוהות, לעיתים גם מוליכי על קרמיים (superconductors ceramic). לחומרים מהסוג הזה יש טמפרטורה קריטית מעל ל $30K$, ולעומת הסוג ה-I יש להם שני קריטיים H_{c1} ו- H_{c2} . כאשר השדה המגנטי חלש מהשדה הקריטי הראשון H_{c1} החומר נמצא בפאזה על מוליכה וכאשר השדה המגנטי חזק יותר מ- H_{c2} החומר נמצא בפאזה המוליכות הרגילה שלו. עבור שדה מגנטי שנמצא בין שני ערכי

Oxide and Metallic Precursor Powders for Superconducting
מעורבת, לכן, לעומת הסוג ה-I המעבר בין הפאזות הוא לא מידי.



איור 1: דיאגרמת פאזות עבור מוליך על מסוג I (משמאל) ומסוג II (מימין)

1.2. אפקט מייזנר

כאשר שמים מוליך בתוך שדה מגנטי, מחוק פאראדיי אנחנו יודעים שיווצרו זרמים על השפה שיתנגדו לשינוי בשטף המגנטי וידעכו בגלל ההתנגדות במוליך עד שבסופו של דבר השדה המגנטי יחדור למוליך. ב-1933 פריץ מייזנר ורוברט אושנפלד ערכו ניסויים חוזרים בפאזת מוליך על, וגילו שבפאזה זו החומר דוחה כל שטף מגנטי כך שהשדה בתוכו מתאפס. הם גילו שהדחייה של השדה המגנטי מתרחשת כאשר מקררים את החומר לפאזה על מוליכה ואז מפעילים שדה על החומר, וגם כאשר מפעילים שדה מגנטי על החומר בפאזה רגילה ואז מקררים אותו לפאזה על מוליכה. תופעה זו של דחיית השדה המגנטי נקראת אפקט מייזנר.

1.3. מוליך על לעומת מוליך אידיאלי

כאשר מפעילים על מוליך רגיל שדה חשמלי \vec{E} , תיווצר צפיפות זרם \vec{J} במוליך בהתאם לחוק אוהם:

$$(2) \quad \vec{J} = \sigma \vec{E}$$

כאשר σ - מוליכות חשמלית, במקרה והטמפרטורה נשארת קבועה כך גם המוליכות תישאר קבועה ותהווה קבוע אופייני של המתכת.

נרצה לבחון מבחינה תיאורטית את המוליך האידיאלי, ההשפעה של שדה חיצוני על החומר והשוואתו למוליך על. כאשר מוליך אידיאלי זה חומר ללא התנגדות חשמלית ולא מקיים אפקט מייזנר. כאשר המוליך האידיאלי נמצא בשדה מגנטי משתנה, בעזרת הביטוי לכוח לורנץ וחוק שני של ניוטון נקבל:

$$(3) \quad e\vec{E} = m_e \vec{a}$$

e – מטען האלקטרון, m_e – מסת האלקטרון, a – תאוצת האלקטרון. בעזרת ההגדרות הבאות:

$$(4) \quad \vec{J} = ne\vec{v} ; \quad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

כאשר \vec{v} – מהירות האלקטרונים בחומר, n – צפיפות האלקטרונים בחומר. נציב את (4) לתוך (3) ונקבל:

$$(5) \quad \vec{E} = \frac{m_e}{ne^2} \frac{\partial \vec{J}}{\partial t}$$

נוכל לרשום את הנוסחה לעיל בצורה הבאה, ולקבל את משוואת לונדון הראשונה:

$$(6) \quad \vec{E} = \mu_0 \lambda^2 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t}$$

כאשר אנחנו מגדירים $\lambda^2 \equiv \frac{m_e}{\mu_0 ne^2}$, ו- μ_0 הוא מקדם הפרמאביליות של הריק. בעזרת משוואות מקסוול

$$(7) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} ; \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} ; \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 ; \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

והפעלה של $\nabla \times \{$ על משוואה (6) והצבה בחוק פאראדיי ב-(7) נקבל:

$$(8) \quad -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \mu_0 \lambda^2 \cdot \vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{J}}{\partial t}$$

נשתמש בחוק אמפר מ-(7) תוך כדי הנחה שהתהליכים איטיים כך שניתן להזניח את זרם ההעתקה, והזהות

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{T}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{T}) - \nabla^2 \vec{T} \quad \text{הוקטורית כדי לקבל:}$$

$$(9) \quad -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \lambda^2 \cdot \vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = \lambda^2 \left[\vec{\nabla} \left(\vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) - \nabla^2 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right] = -\lambda^2 \nabla^2 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

והפתרון למשוואה (9) יהיה:

$$(10) \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{\partial \vec{B}(0)}{\partial t} \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right)$$

ממשוואה (10) אנחנו מסיקים שהשדה הופך לקבוע לאחר מרחק λ לתוך המוליך. מגילוי של אפקט מייזנר אנחנו יודעים שבתוך מוליך על השדה המגנטי מתאפס $\vec{B} = 0$ לעומת מוליך אידיאלי בו $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$. ב-1935 האחים פריץ והיינץ לונדון הציעו תיאור פנומנולוגי לאפקט מייזנר בצורה של משוואת לונדון השנייה:

$$(11) \quad -\vec{B} = \mu_0 \lambda^2 \cdot \vec{\nabla} \times \vec{j}$$

בעזרת משוואת לונדון השנייה, נבצע את אותו פיתוח שעשינו לעיל ונקבל את המשוואה:

$$(12) \quad \vec{B} = \vec{B}(0) \exp\left(-\frac{z}{\lambda_L}\right)$$

כאשר λ_L – נקרא עומק החדירה של לונדון ובדרך כלל נמצא בטווח של $50 - 500 \text{ nm}$. נוסחה (12) בעצם מתארת את אפקט מייזנר, כך שמעבר ל- λ_L השדה המגנטי מתאפס.

על סמך הניתוח לעיל אנחנו רואים שההבדל העיקרי בין מוליך על למוליך אידיאלי מתבטא בעיקר בתגובה של המוליך לשדה מגנטי. השדה המגנטי בתוך מוליך אידיאלי נשאר קבוע בעל ערך שונה מאפס או אפס, לעומת זאת מוליך על מציג את אפקט מייזנר בו השדה המגנטי מתאפס מעבר לעומק λ_L בתוך החומר.

1.4 גינזבורג-לנדאו

כאשר לנדאו פיתח את התיאוריה לתיאור מעברי פאזה ואפיונם, הוא טען שניתן לתאר את הסדר במערכת על ידי פרמטר סדר ומעבר הפאזה יתאפיין בסדר הנגזרת של הפרמטר בה היא כבר לא אנליטית (חוסר אנליטיות בנגזרת השנייה תגדיר את המעבר פאזה כמעבר מסדר שני). על סמך תיאוריה זו לנדאו וגינזבורג תיארו את פרמטר הסדר כמורכב כך:

$$(13) \quad \psi(r) = \psi(0)e^{-i\theta(r)}$$

כאשר ניתן להתייחס ל- $\psi(r)$ כפונקציית הגל המקרוסקופית של נושאי המטען במוליך על, שהם זוגות קופר(עליהם נפרט בהמשך) כך ש $|\psi(r)|^2$ זו צפיפות זוגות קופר ו- $\psi(r) \xrightarrow{T \rightarrow T_c} 0$. $\theta(r)$ היא פאזה עבודה יש לנו חופש כיוול. בעזרת התיאוריה הזו ותורת שדות, אם נעשה מינימיזציה לאנרגיה החופשית ביחס לפרמטר

$$(14) \quad \vec{j} = \frac{2e}{m} [\hbar \vec{\nabla} \theta - 2e \vec{A}] \cdot |\psi|^2$$

סדר נקבל ביטוי לצפיפות הזרם עם צימוד לפוטנציאל וקטורי:

אם נעשה אינטגרל מסלולי על שני האגפים על מסלול סגור במוליך על, נקבל:

$$(15) \quad \phi + \oint \frac{m}{2e^2 \rho} J \cdot dl = n\phi_0$$

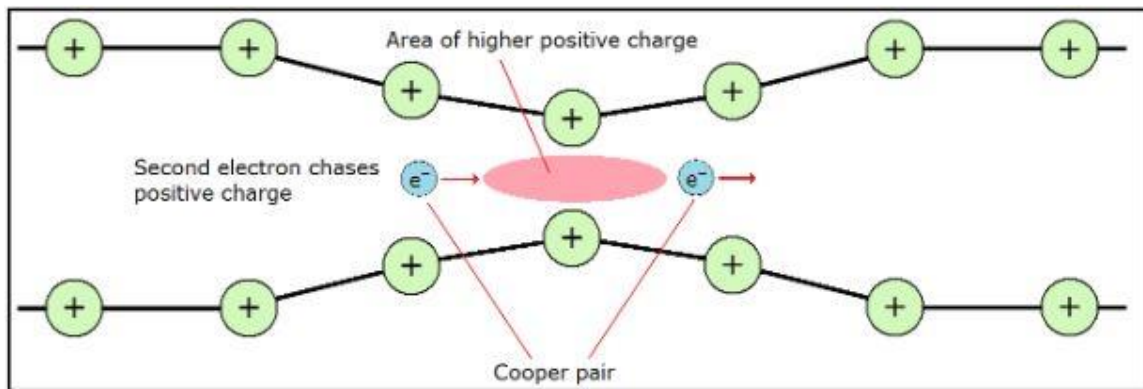
אם המסלול מרוחק משפת המוליך, ניתן להזניח את האיבר השני במשוואה, כך שיתקבל הקשר:

$$(16) \quad \phi = n\phi_0; \phi_0 = \frac{h}{2e}; n \in \mathbb{N}$$

וזו תופעה קוונטית במוליך על של קוונטיזציה של השטף המגנטי ביחידות של ϕ_0 – פלקסון (fluxon).

1.5. תיאוריית BCS וזוגות קופר

התופעה של מוליכות על עדיין לא לחלוטין מובנת. בניסיון להסביר אותה הוצע מודל מיקרוסקופי על ידי ברדיין (Bardeen), קופר (Cooper) ושרייפר (Schrieffer) ב-1957 אשר מצליח לתאר מוליכי על מהסוג I-היטב אך נכשל במוליכים מהסוג II-ה. התיאוריה גורסת כי בטמפרטורה נמוכה האינטראקציה של האלקטרונים עם הפונונים זניחה ביחס לאינטראקציה הקולומבית של אלקטרונים עם הניוקלאונים בחומר. כלומר כאשר החומר בפאזה מוליכות-על התנועה של אלקטרון מזיזה את הניוקלאונים מעט כך שנוצרת צפיפות מטען חיובית מקומית ובכך מושכת אחריה עוד אלקטרון, וכך נוצר מצב בו שני האלקטרונים נעים יחד כזוג המכונה זוג קופר או זוג BCS.



איור 2: אילוסטרציה של היווצרות זוגות קופר במוליך על [6]

1.6. אפקט ג'וזפסון

אפקט נוסף שקיים במערכת בפאזה של מוליכות-על מתייחס לאינטראקציה בין שני מוליכי על בצימוד חלש, תופעה שנקראת "מוליכות-על חלשה". התופעה נחזתה על ידי בריאן ג'וזפסון ב-1962 ומהר מאוד אוששה בתצפיות. נתאר שני מוליכי על בעזרת משוואה (13):

$$(17) \quad \psi_n(r) = \psi(0)e^{-i\theta_n(r)}; n \in \{1,2\}$$

הפרש פאזה בין המוליכים הוא: $\varphi = \theta_1 - \theta_2$. כאשר המוליכים במגע $\varphi = 0$, וכאשר הם מרוחקים אין כלל קשר בין הפאזות. כמו ג'וזפסון, אנחנו מעוניינים במקרה בו המוליכים קרובים אחד לשני אך מופרדים על ידי חומר בעל התנגדות שונה מ-0 (אוויר, מוליך רגיל, מבודד) כך שפונקציות הגל של שני המוליכים חופפות ומאפשרות מעבר של זוגות קופר בלי לפגוע בפאזות המוליכות-על. הזרם העובר בצומת תלוי בהפרש הפאזות בין המוליכים ומתואר כך:

$$(18) \quad I = I_c \sin(\varphi)$$

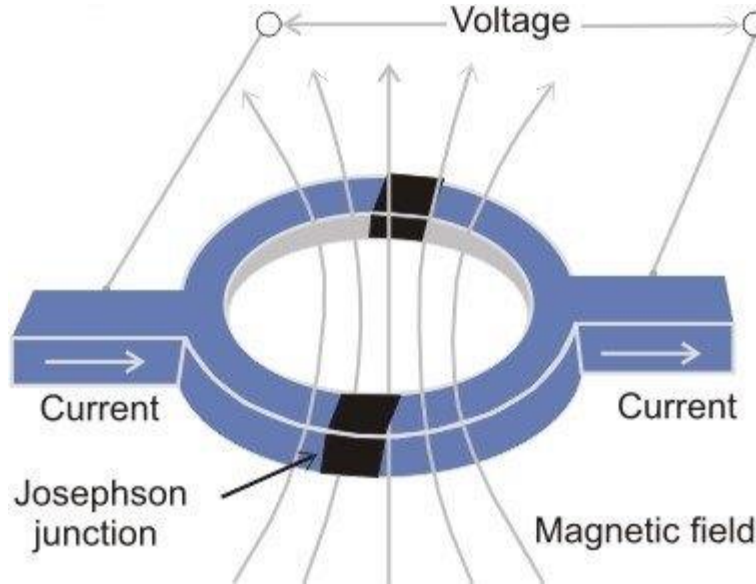
כאשר I_c זה הזרם המירבי שיכול לעבור בצומת ללא התנגדות, משוואה (18) מתארת את אפקט ג'וזפסון עבור זרם ישר. במקרה וישנו זרם חילופין במערכת כלומר מופעל מתח על הצומת, ניתן לתאר את הפרש הפאזות בעזרת הנוסחה:

$$(19) \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2e}{h} V(t)$$

והזרם בצומת יתואר על ידי נוסחה (18) כאשר הפרש הפאזות בסינוס יהיה תלוי בזמן ויפתור את משוואה (19).

1.7 SQUID – Superconducting Quantum Interference Device

ה-SQUID הינו מכשיר רגיש ביותר למדידת שדות מגנטיים מסדר גודל של $5 \cdot 10^{-14} T$ [4]. המכשיר בניסוי שלנו מורכב מטבעת קטנה של מוליך על מסוג YBCO (עליו נפרט בהמשך) עם שני צמתי ג'וזפסון מחוברים במקביל כמתואר באיור מס' 3.



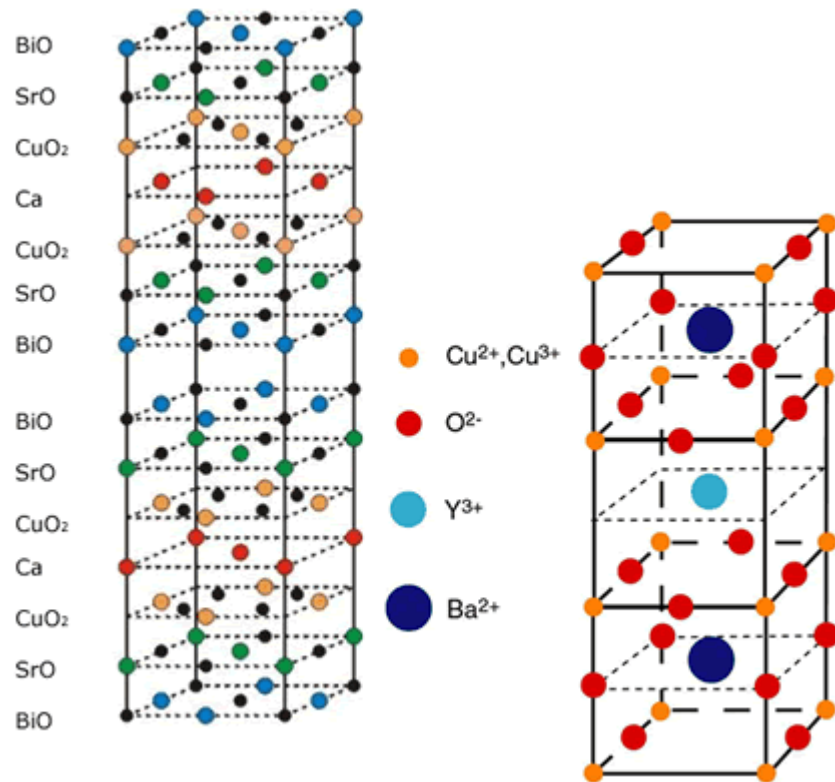
איור 3: איור של SQUID [6]

כאשר אין שינוי בשדה המגנטי, הזרם העובר ב-SQUID מתחלק שווה בין שני הצמתיים. אם יש שינוי בשדה המגנטי ממשוואות מקסוול אנחנו יודעים שייוצרו זרמים בטבעת וזה יוביל לזרמים שונים בכל אחד מהצמתיים ויוביל לשינוי במתח על הטבעת כאינדיקציה לשינוי בשטף של השדה המגנטי.

1.8 מוליכות-על בטמפרטורות גבוהות – YBCO ו-BSCCO

ב-1986, חוקרים ב-IBM פיתחו תרכובת קרמית שנכנסת לפאזה של מוליכות על בטמפרטורה של $35K$ ובכך פתחו תחום חדש של מחקר של מוליכי על בטמפרטורות גבוהות. מאז התגלו עוד תרכובות עם טמפרטורות קריטיות של מעל $77K$, מה שמאפשר שימוש נרחב יותר בחומרים מפני שזו טמפרטורת הרתיחה של חנקן נוזלי. אחד החומרים האלה הוא ה-YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide), וזה החומר אותו אנחנו מכינים ובוחרים בניסוי. לחומר הזה יש מספר גרסאות הנבדלות ביניהן בריכוזים של כל אחד מהאלמנטים, אנחנו נעבוד עם $YB_2C_3O_7$ המכונה גם Y123 ולו טמפרטורה קריטית של כ- $92K$ [2].

חומר נוסף אשר נכנס לקטגוריה של מוליכי על בטמפרטורה גבוהה הוא ה-BSCCO (Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide). את החומר הזה אנחנו מכינים ובוחרים במעבדה במסגרת ניסוי ההרחבה שלנו. כמו ה-YBCO, ל-BSCCO יש גם גרסאות שונות הנבדלות זו מזו בריכוזים של כל אחד מהאלמנטים. אנחנו נעבוד עם $B_2S_2CaCu_2O_8$ המכונה BSCCO-2212 או Bi-2212 ולו טמפרטורה קריטית של כ- $96K$ [3]. הסידור האטומי של תא היחידה של כל אחד מהם מוצג באיור 4:



איור 4: מימין – YBCO, משמאל – BSCCO [6]

1.9. נוסחאות נוספות

חישוב אי-וודאות של פונקציה התלויה בכמה משתנים עם אי-וודאויות משלהם:

$$(20) \quad \Delta f(x_1 \dots x_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

:t-test

$$(21) \quad t = \frac{|x_{measured} - x_{known}|}{\Delta x_{measured}}$$

2. ניסוי מספר 1 – מתח כתלות בזרם במערכת SQUID

2.1 מטרות הניסוי

מטרת הניסוי הינה להכיר את מערכת ה-SQUID ולמדוד את עקומת ה- $V - I$ של המערכת.

2.2 תיאור המערכת

המערכת בנויה ממערכת SQUID כמתוארת בתיאוריה, מודל של חברת STAR Cryoelectronics, LLC. מערכת של שתי מוליכי-על שיוצרים שתי צמתי ג'וזפסון מחוברים במקביל, כפי שמתואר באיור 3. למערכת מחובר סקופ עם חיבור BNC.

נציין כי במערכת הזרם עובר במגבר עם הגבר של 1000 ובהתנגדות של 10Ω , לכן המערכת מראה זרמים עם פקטור של 10^4 .

2.3 מהלך הניסוי

הכנת המערכת:

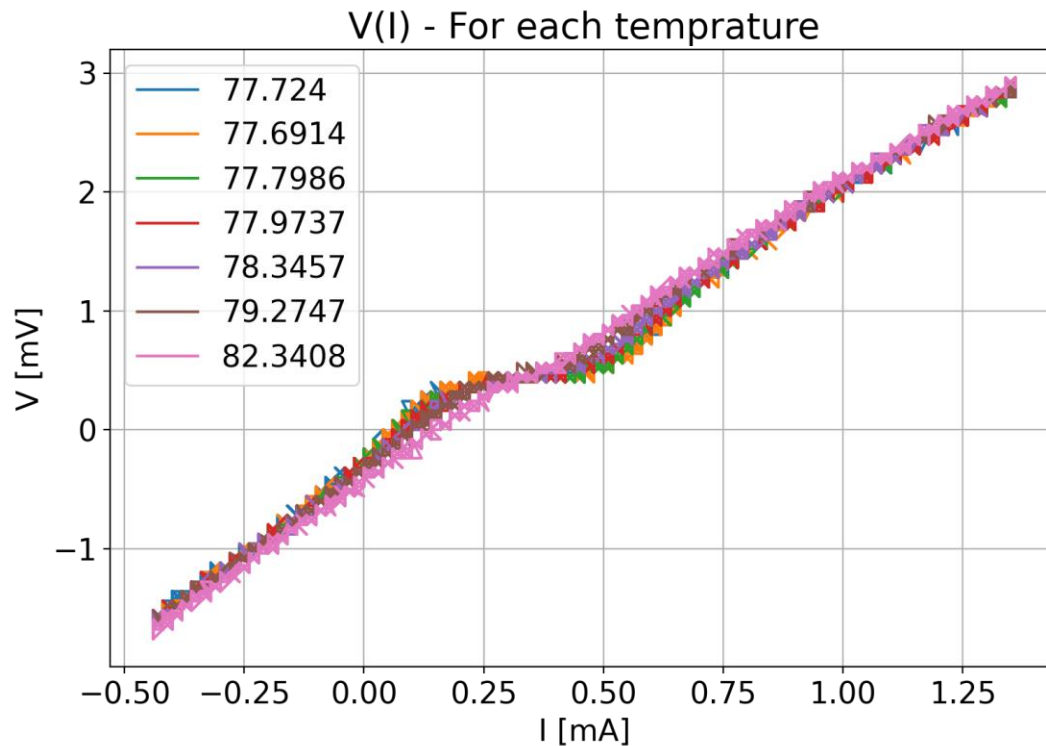
- הדלקנו את מערכת ה-SQUID והסקופ במצב $V - I$.
- כיוונו את הציר האנכי ל- $2V/div$, האופקי ל- $0.5V/div$ ומרכזנו את הנקודה הנמדדת למרכז המסך.
- שמנו את ה-FLUX OFFSET וה-CURRENT OFFSET באפס ואת SWEEP OUTPUT עד הסוף שמאלה.
- הזזנו את CURRENT OFFSET עד שהנקודה בסקופ התמרכזה.

מדידת $V - I$:

- עברנו בסקופ למצב DC והזזנו את ה-CURRENT OFFSET עד להגעת זרם קריטי (לפי שיפוע המתח).
- שינינו את ה-SWEEP OUTPUT עד שהתוצאות התרחבו מספיק שרואים את שתי ה"ברכיים".
- שמרנו את התוצאות מהסקופ והעברנו אותם לעיבוד במחשב על ידי דיסק-און-קי.

2.4 תוצאות הניסוי

להלן המתחים כתלות בזרם עבור כל הטמפרטורות השונות שנמדדו:



איור 5: תוצאות ניסוי 1

כאשר חלק מהקווים לא רואים בצורה ברורה, אך החפיפות ביניהם ממש בגודל של רזולוציית המכשיר, לכן לא היה ניתן להראות אותם בצורה איורית טובה יותר. לכן, נציג את ה"ברכיים" שחושבו בטבלה הבאה:

זרם קריטי [mA]	טמפרטורה [K]
0.22 ± 0.02	77.69 ± 0.1
0.21 ± 0.02	77.72 ± 0.1
0.20 ± 0.02	77.79 ± 0.1
0.18 ± 0.02	77.97 ± 0.1
0.17 ± 0.02	78.34 ± 0.1
0.15 ± 0.02	79.27 ± 0.1
0.10 ± 0.02	82.34 ± 0.1

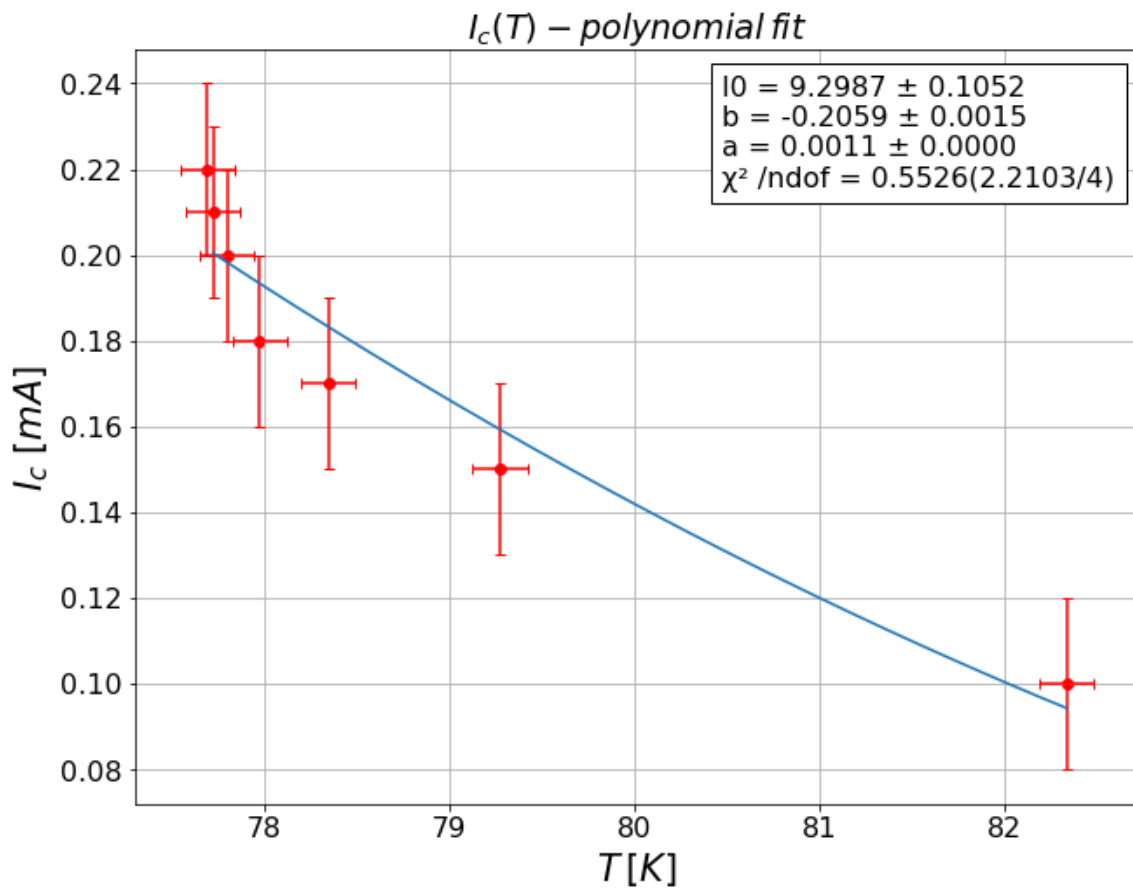
טבלה 1: ערכי זרם קריטי כתלות בטמפרטורה

כאשר האי-הומוגניות נובעת מרגישות המכשיר למדידה ובטמפרטורה מהקפיצות שראינו במדידה בזמן אמת. ידוע לנו שאנו הצגנו ספרה לא משמעותית בטמפרטורה, אך בגלל קרבת הערכים הנמדדים, היה לנו חשוב בכל זאת להדגיש את ההבדלים הקטנים ביניהם, גם בסדר גודל נמוך מאי-הומוגניות.

2.5 עיבוד תוצאות

הזרמים הקריטיים הוערכו בטבלה 1 לפי הערכים הקיצוניים ביותר בשתי ערכי המתח הרחבים ביותר (בעלי כמות הערכים הנמדדים הגדולה ביותר). יחד עם זאת, בגלל שהתוצאות לא ממורכזות בדיוק סביב ראשית הצירים, ערכי הברכים חושבו כ- $I_{knee} = (I_R - I_L)/2$ כאשר I_R, I_L ערך הזרם בדרך הימנית והשמאלית בהתאמה.

ביצענו התאמה לפונקציה $y = ax^2 + bx + I_0$, וקיבלנו:



איור 6: זרם קריטי כתלות בטמפרטורה, Mr. SQUID

כאשר לפי הקשר $T_c = \sqrt{\frac{I_0}{a}}$ נקבל את תוצאתינו: $T_c = (91.9 \pm 0.5) K$. אי הומוגניות חושבה על ידי הנגזרות החלקיות.

לפי מקור [5], הטמפרטורה הקריטית של YBCO הינה $93 K$. לכן נוכל לחשב t-value ושגיאה יחסית:

$$t = 2.2\sigma$$

$$\Delta_{rel} = 1.2\%$$

2.6 דיון בתוצאות ומסקנות

- הצלחנו להפעיל את המערכת ולקבל תוצאות $V(I)$ כפי שמצופה עבור מוליך-על – איזור בו ההתנגדות בקירוב אפסית, איזורים בהם ההתנהגות כחוק אום ואיזורי מעבר ביניהם.
- ההתאמה באיור 6 יצאה די טובה, עם $\frac{\chi^2}{NDOF} = 0.55$. אם כי ניתן לציין שערכו הנמוך מ-1, יחד עם העובדה שקו ההתאמה עובר בתוך כל סוגרי השגיאה, מצביע על לקיחת אי-ודאות גדולה מדי.
- התאמת התוצאה הסופית של $T_c = (91.9 \pm 0.5)K$ התקבלה בהתאמה מספיק טובה – שגיאה יחסית טובה של 1.2% והתאמה סבירה של 2.2σ .
- אנו מעריכים כי הגורם המשמעותי ביותר לשגיאה מהתוצאה האמיתית היא רגישות המכשיר, כפי שקיבלנו תוצאות עם דיסקטיזציה משמעותית באיזורי הברכיים וההבדלים בין הטמפרטורות השונות שנמדדו היו בגודל שהפרש דיסקרטי יחיד. הצעה לשיפור בעקבות כך היא לשים יותר דגש על ריווח טמפרטורות גדול יותר וקפיצות אחדות יותר, למרות שקשה לשלוט בזה עם המערכת הנוכחית.
- גורם משני לשגיאה הוא אי הודאות בטמפרטורה. היה ניתן לראות כי היה דיילי בין שינוי טמפרטורה לשינוי תואם במדידות, זהו המקור לאי ודאות בציר זה. הצעה לשיפור הינה לנסות למדוד דיילי זה בממוצע ולהכניסו לחישוב בעיבוד נתונים.

3. ניסוי מספר 2 – מתח כתלות בשטף מגנטי במערכת SQUID

3.1 מטרות הניסוי

מטרת הניסוי הינה להכיר את מערכת ה-SQUID ולמדוד את עקומת ה- $V - \Phi$ של המערכת.

3.2 תיאור המערכת

המערכת זהה למערכת בניסוי 1.

3.3 מהלך הניסוי

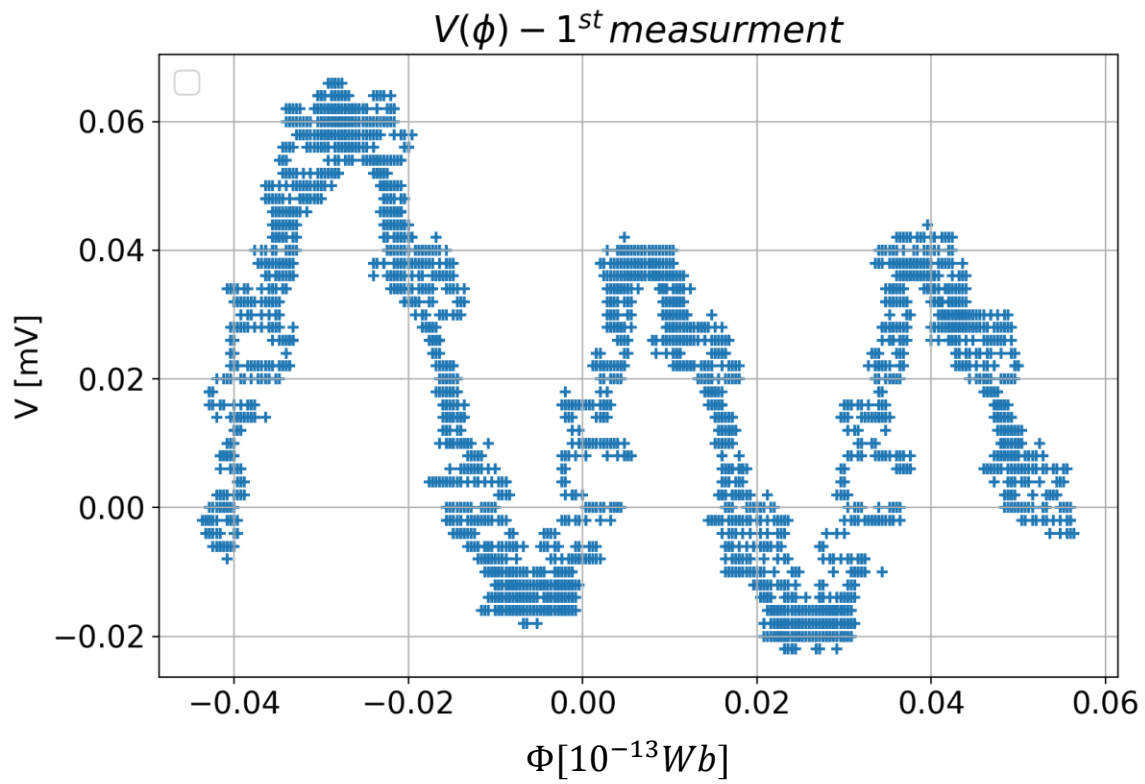
המערכת הודלקה באופן זהה לניסוי 1.

מדידת $V - \Phi$:

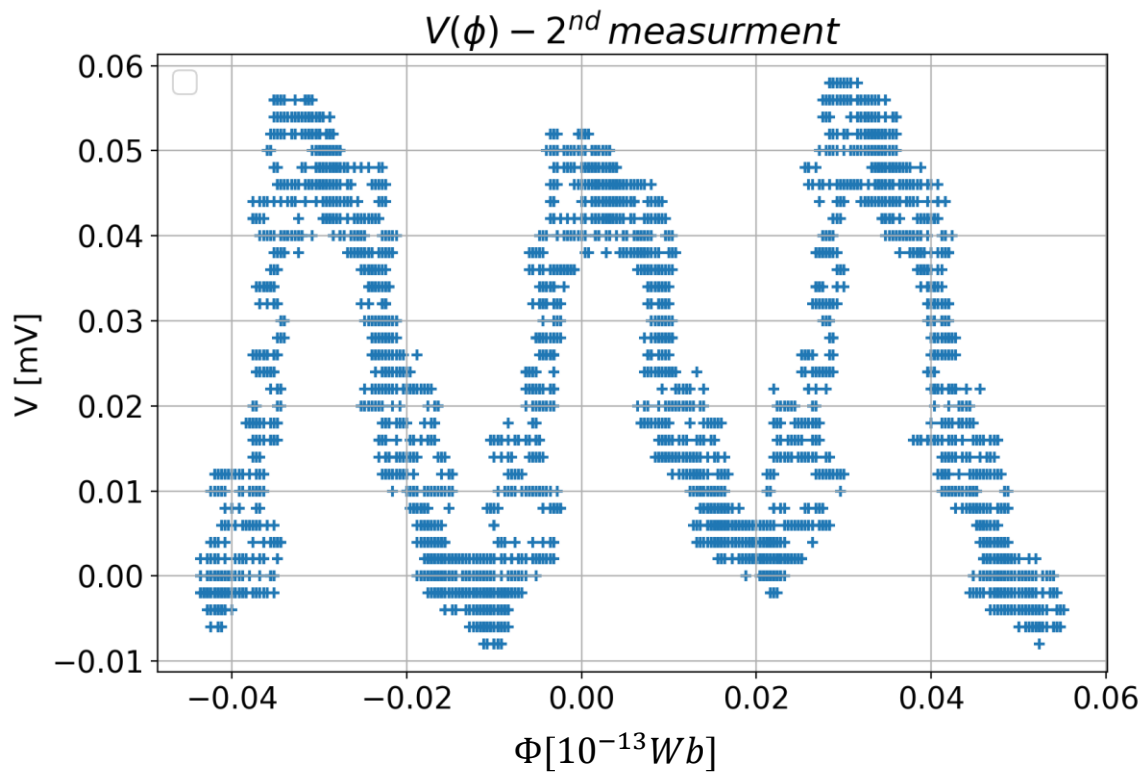
- כאשר ה-SWEEP OUTPUT כבוי, נשנה את ה-CURRENT OFFSET עד שנהיה מעל לזרם הקריטי.
- שינינו למצבים $V - \Phi$ ו-AC בסקופ.
- העלנו את ה-SWEEP OUTPUT עד לקבלת עקומה והקטנו את הסקאלה של המתח עד שראינו את האוסילציות באופן ברור.
- לחצנו על RUN/STOP עד לקבלת מספר תמונות עם מחזוריות ברורה.
- שמרנו תמונות אלו והעברנו אותם לעיבוד במחשב על ידי דיסק-און-קי.

3.4 תוצאות הניסוי

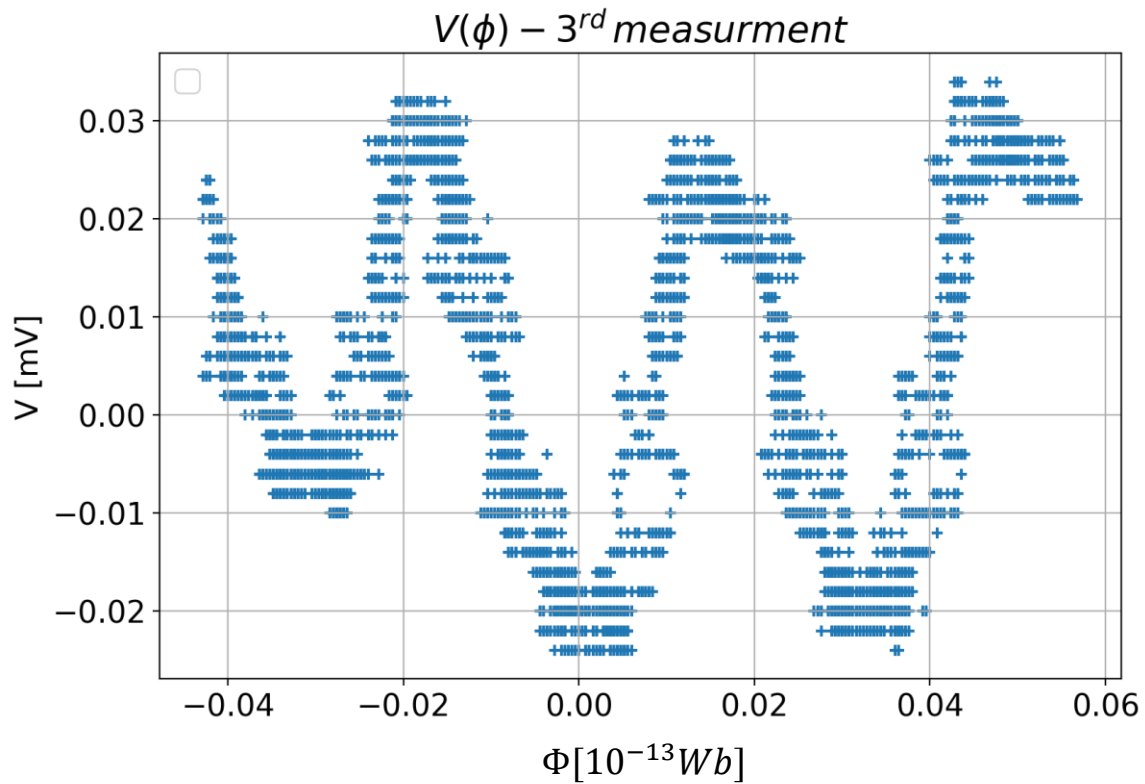
להלן שלושת המתחים בכתלות בשטף שנמדדו:



איור 7: מדידה ראשונה למתח כתלות בשטף



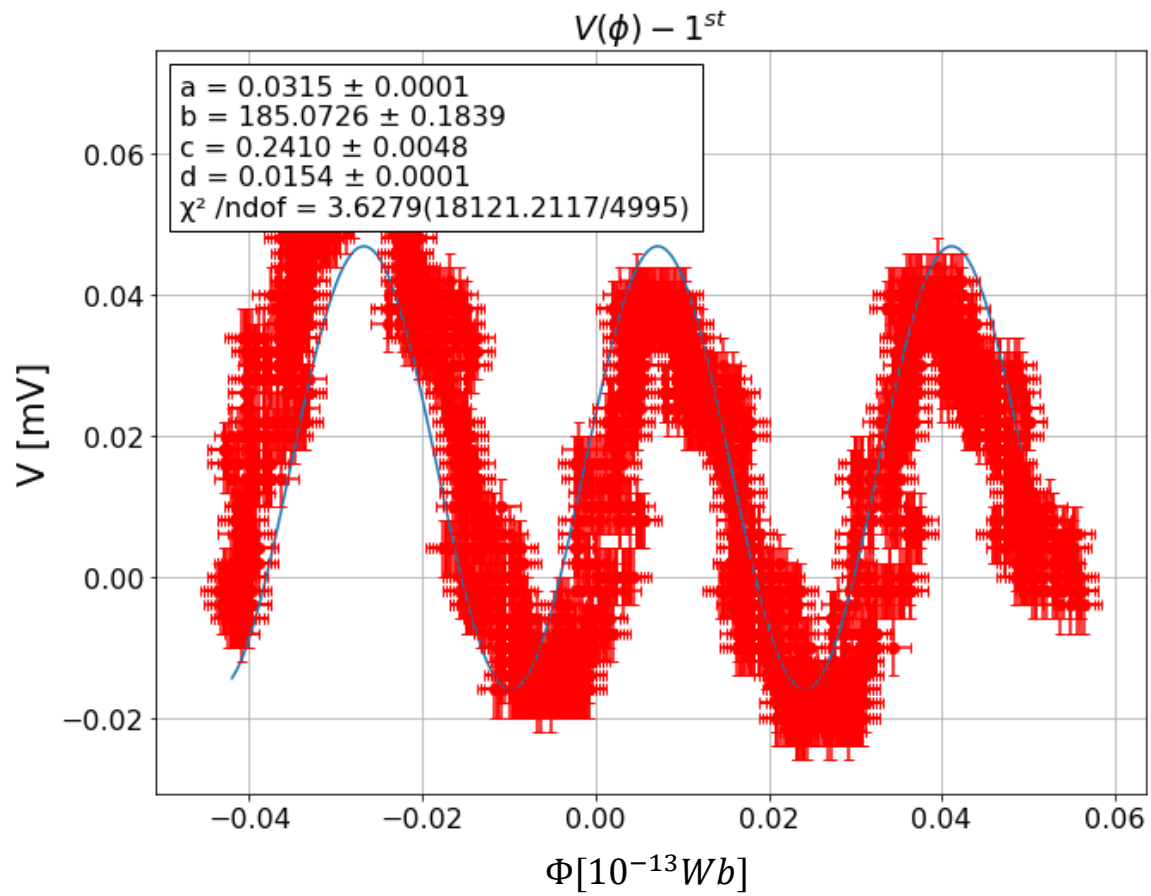
איור 8: מדידה שנייה למתח כתלות בשטף



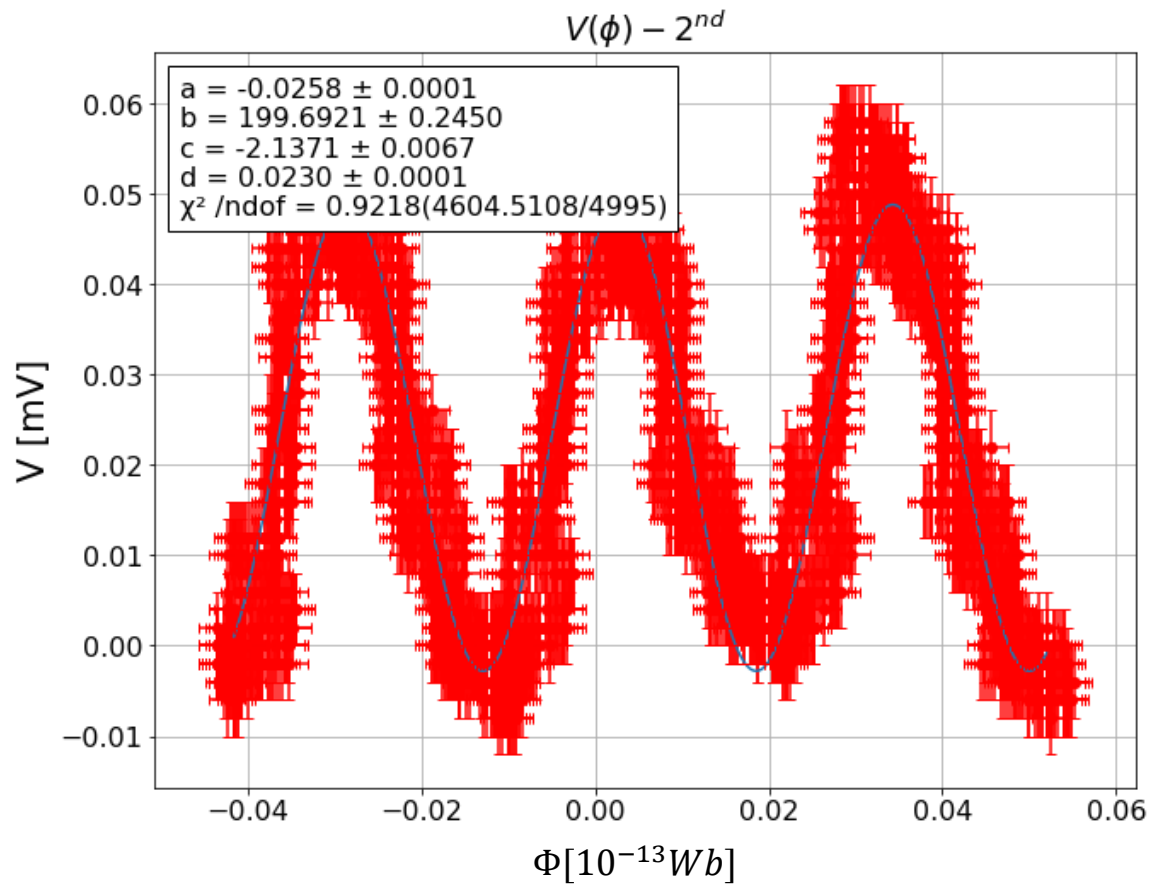
איור 9: מדידה שלישית למתח כתלות בשטף

3.5 עיבוד תוצאות

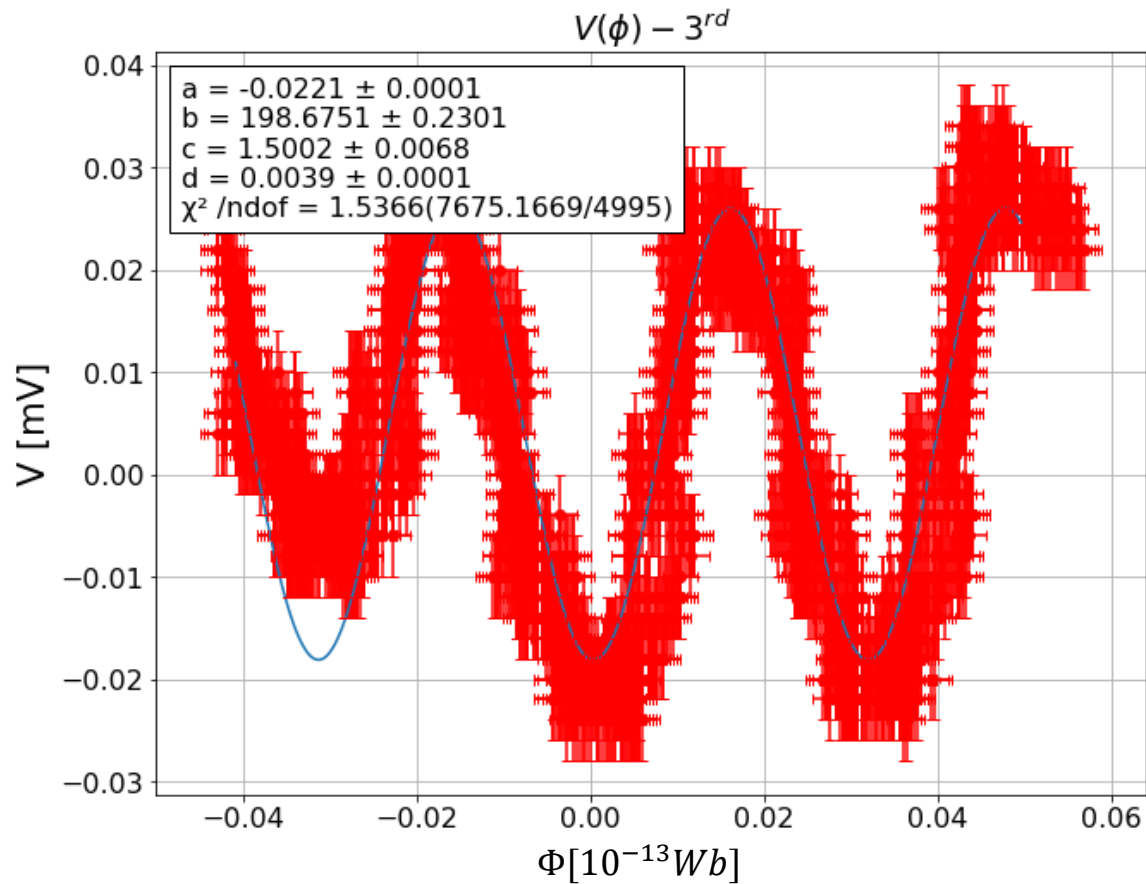
ביצענו התאמה לפונקציה מחזורית: $f = a \cdot \sin(bx + c) + 0.002$. נציין כי 0.002 הינו התיקון בגובה להתאמה, שחושב על ידי מיצוע הנקודות. להלן ההתאמות:



איור 10: התאמה למתח כתלות בשטף 1



איור 11: התאמה למתח כתלות בשטף 2



איור 12: התאמה למתח כתלות בשטף 3

כאשר המתח בציר האופקי פרופורציוני לזרם, אשר פרופורציוני לשטף המגנטי.

לא ידועה לנו ההמרה מוולטים לווברים כפי שאיננו יודעים גודל לולאה וכו'.

נשתמש בקשר שמופיע בתדריך [4] המקשר בין התדירות לפלאקסון: $\Phi_0 = \frac{\pi}{b}$ ונקבל את שלושת התוצאות:

$$\Phi_0 = (1.6 \pm 0.3)fWb, (1.6 \pm 0.3)fWb, (1.7 \pm 0.3)fWb$$

כאשר ניתן למצע ולקבל: $\Phi_0 = (1.6 \pm 0.2)fWb$

הערך הספרותי של הפלאקסון הוא: $2.06 \cdot 10^{-15} Wb$. עבורו קיבלנו התאמה של:

$$t = 2.3\sigma$$

$$\Delta_{rel} = 22\%$$

3.6 דיון בתוצאות ומסקנות

- הצלחנו לקבל צורה מחזורית עבור המתח כתלות בשטף (גם אם הינה רחוקה מלהיות אידיאלית – מבחינת הפלקטואציות באמפליטודה, עובי הקו שיצרו וכדומה).
- התוצאה קצת רחוקה מהספרותית, עם שגיאה יחסית של 22%, אבל עם אי ודאות די גדולה שמשאירה אותנו עם התאמה סבירה של 2.3σ .
- ייתכן וגורם שגיאה הוא שדה מגנטי חיצוני שהיה במעבדה והשפיע על ידי ערבוב בשטף שנוצר במערכת.

4. ניסוי מספר 3 – YBCO

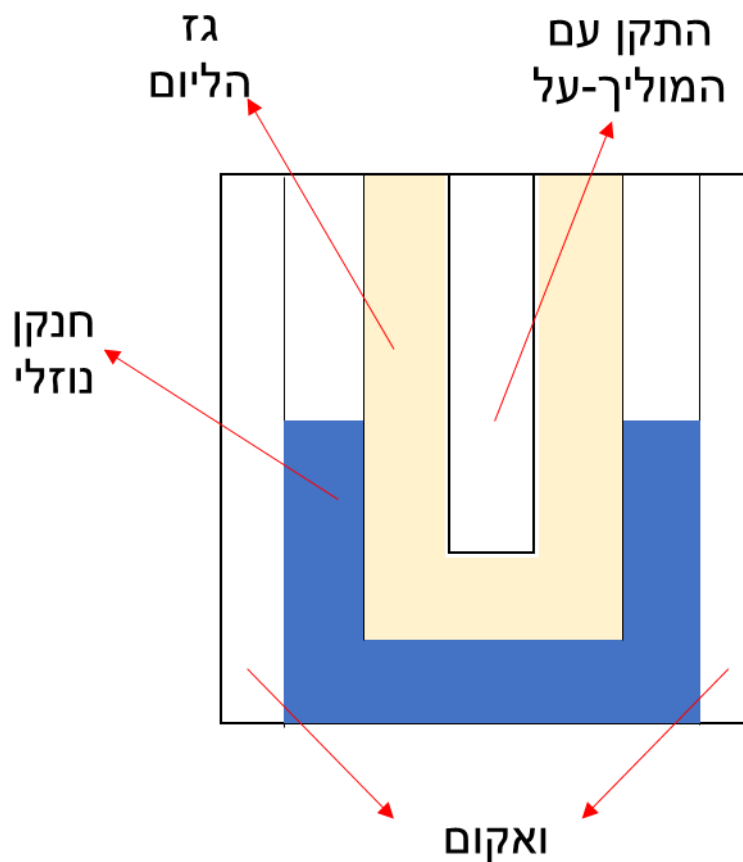
4.1 מטרות הניסוי

מטרת הניסוי הינה להצליח לבנות דסקה של YBCO שתאפשר פאזת מוליכות-על ומדידת הטמפרטורה הקריטית שלה.

4.2 תיאור המערכת

עבור בניית המוליך-על המערכת בנויה מאבקות החומרים: Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO . עבורם יש משקל ברזולוציה של $\pm 0.001g$, תנור שמגיע עד לכל הפחות ל- $900^{\circ}C$, לוחץ שמגיע עד לכוח של 11ton, בוחש וקערה לערבוב ודחיסת אבקה, כוהל לניקוי כלים, כפפות גומי, קערות פלסטיק, כפית ומתקן שמאפשר לאבקה בתוכו להדחס לצורת דיסקה.

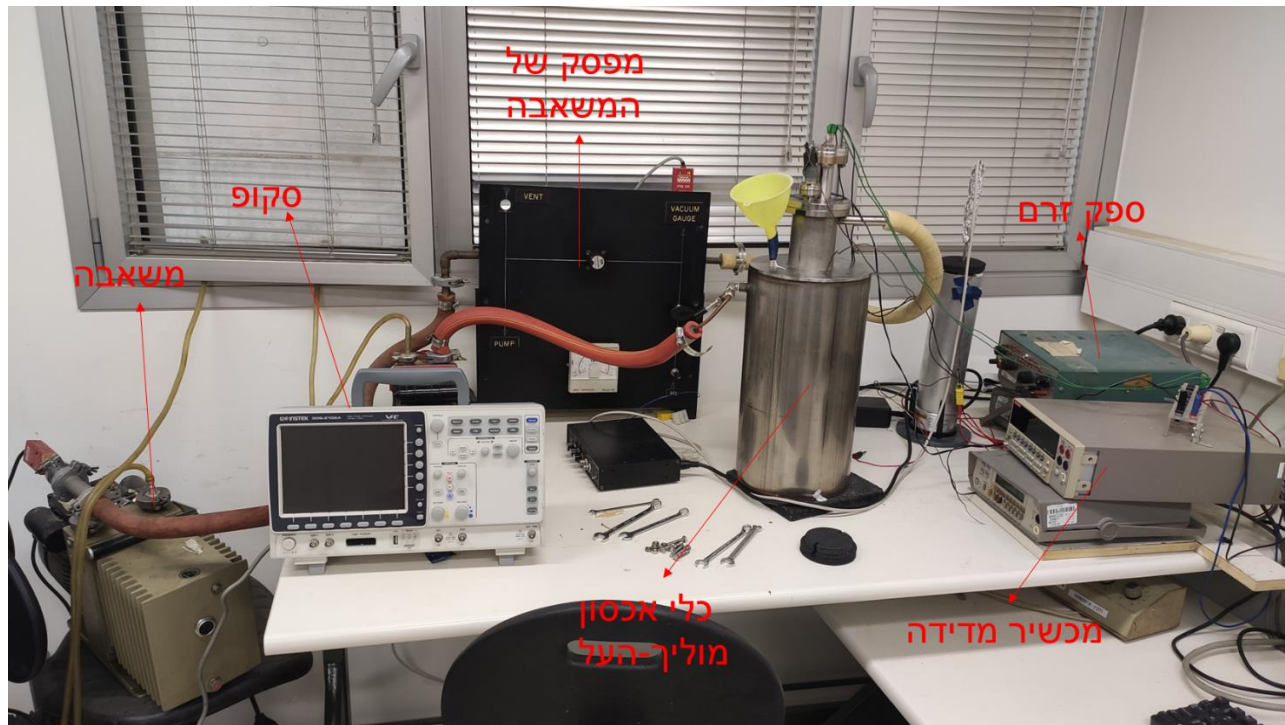
עבור המדידה יש במעבדה חנקן נוזלי, משאבת ואקום, משאבת הליום, מד התנגדות, מד מתח, ספק זרם וקבלים שמחברים בין הרכיבים. מתקן אכסון מוליך-העל בנוי בצורה הבאה (תמונת חתך):



איור 13: חתך מתקן המדידה

כאשר השכבה החיצונית מחוברת למשאבה שמצליחה להוריד את הלחץ עד ל- 10^{-1} torr. שכבה אחת פנימה ממולאת בחנקן נוזלי עד לגובה שמספיק לכסות את גובה המוליך-על. השכבה הפנימית אטומה בברגים ומחוברת למשאבה ששואבת את האוויר מתוכה ומכניסה גז הליום (לא בו-זמנית כמוכך) ובתוכה המתקן עם המוליך-על. המתקן בנוי ממוט מתכתי סיביבו מלופפים חוטי חשמל נכנסים ויוצאים, כאשר מה שמחבר ביניהם הם שיניים מתכתיות הלוחצות את המוליך-על משתי צדדיו. החוטים יוצאים כ"רגליים" שמחוברות בהתאמה לקבלים של הזרם ומד המתח.

כל זאת ניתן לראות באיורים הבאים:



איור 14: מערכת הניסוי 1



איור 15: מערכת הניסוי 2

4.3 מהלך הניסוי

להכנת המוליך-על:

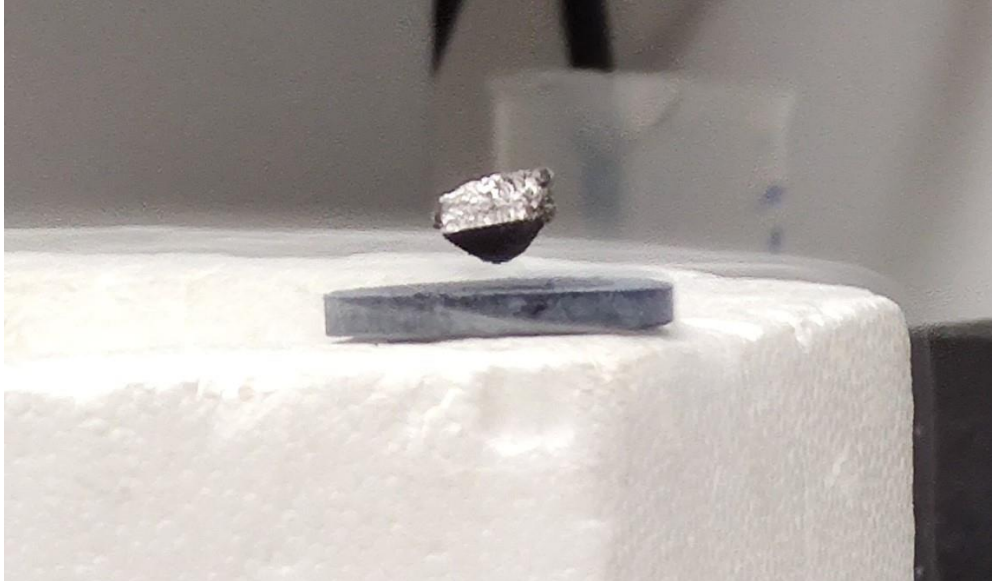
- חישובנו את הכמויות הנדרשות מכל חומר: $2.3g$ של Y_2O_3 , $7.9g$ של $BaCO_3$ ו- $4.7g$ של CuO .
- שקלנו ולקחנו את הכמויות המתאימות מכל חומר, ערבבנו ובחשנו אותם עד לתערובת אחידה.
- לחצנו את התערובת לדסקה תחת כוח של $6\ ton$ ושמו אותה בתנור ל: $470^{\circ}C$ בקצב של $150^{\circ}C/hr$, אז 20 שעות ב- $470^{\circ}C$, אז חימום ל- $950^{\circ}C$ בקצב של $150^{\circ}C/hr$, אז 15 שעות ב- $950^{\circ}C$, אז קירור ל- $400^{\circ}C$ בקצב של $40^{\circ}C/hr$ ולבסוף קירור לטמפרטורת החדר בקצב $150^{\circ}C/hr$.
- הוצאנו את הדסקה, בחשנו לאבקה, לחצנו אותה לדיסקה שוב פעם ושמו בתנור ל: $970^{\circ}C$ בקצב של $150^{\circ}C/hr$, אז 20 שעות ב- $970^{\circ}C$, אז קירור ל- $400^{\circ}C$ בקצב של $40^{\circ}C/hr$ ולבסוף קירור לטמפרטורת החדר בקצב $150^{\circ}C/hr$.

למידה:

- הכנסנו את המוליך-על למתקן, הברגנו את המכסה וחיברנו את החיבורים החשמליים בהתאמה.
- שאבנו את השכבה החיצונית במתקן, מילאנו את האמצעית בחנקן נוזלי ומילאנו את הפנימית בהליום.
- מדדנו את המתח כתלות בזמן (מידה כל 3 שניות) תוך כדי התקררות המוליך-על עבור 8 זרמים שונים.

4.4 תוצאות הניסוי

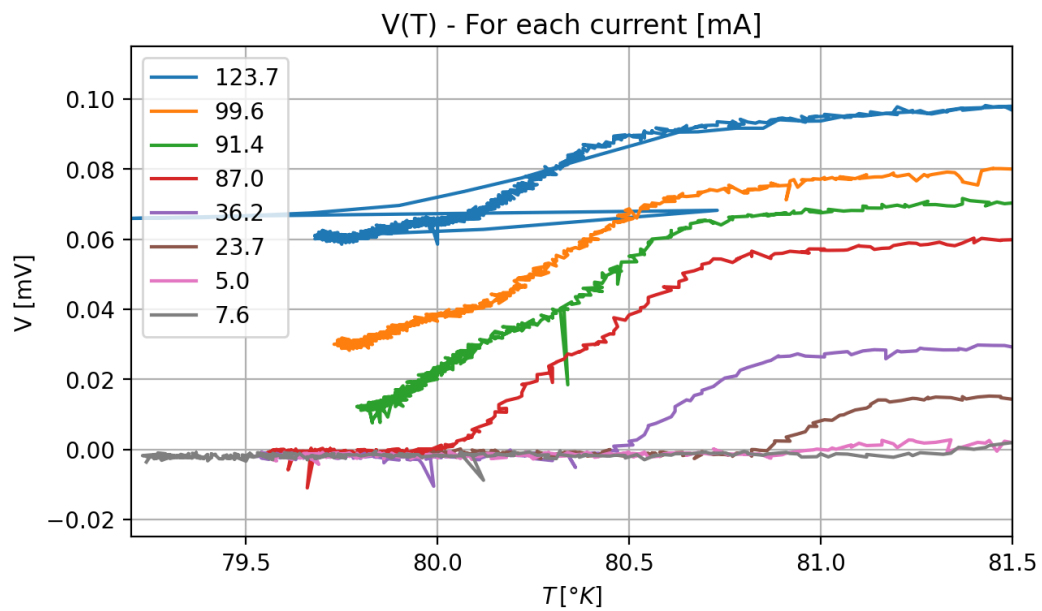
הצלחנו לבנות דיסקה של YBCO כאשר מתרכבת שלה הינה $YBa_2Cu_3O_7$ (לפי [1]) ובטמפרטורת חנקן נוזלי הצלחנו לגרום למגנט לרחף מעליו:



איור 16: ריחוף מגנט מעל מוליך-על

כאשר האובייקט התחתון הוא דסקת ה-YBCO.

תוצאות המדידה:



איור 17: תוצאות מדידת מתח כתלות בטמפרטורה עבור זרמים שונים

4.5 עיבוד תוצאות

המתח האפסי לא התיישב בדיוק על $V = 0$ אז כיילנו לפי הממוצע נקודות אחרי המעבר לפאזה מוליך-על, מתח זה יצא $V = -0.0013mV$.

נקודות החיתוך שחושבו על ידי אקסטרפולציה/אינטרפולציה לינארית (כתלות אם חתכו את ה"אפס" או לא):

זרם [mA]	טמפרטורה קריטית [K]
99.6 ± 0.1	79.0255 ± 0.8
91.4 ± 0.1	79.604 ± 0.8
87.0 ± 0.1	79.983 ± 0.8
36.2 ± 0.1	80.393 ± 0.8
23.7 ± 0.1	80.776 ± 0.8
5.0 ± 0.1	80.672 ± 0.8
7.6 ± 0.1	81.394 ± 0.8

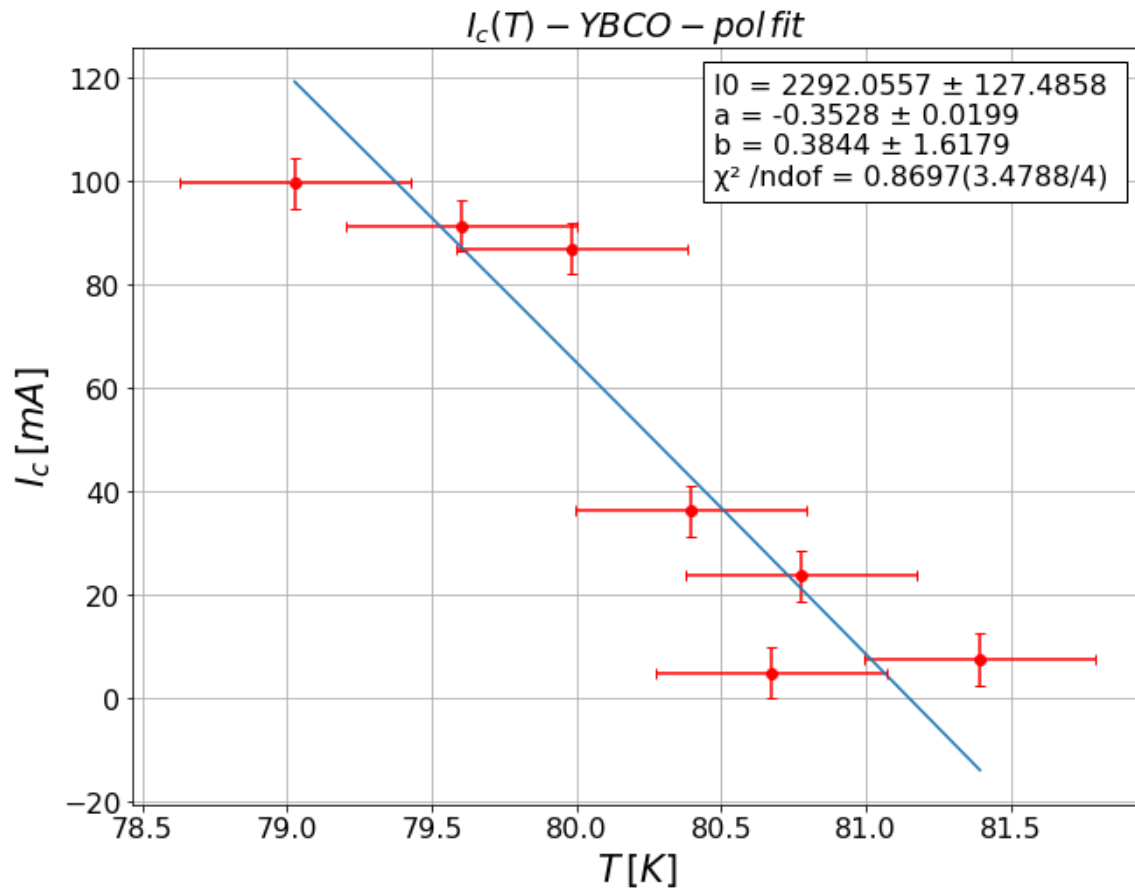
טבלה 2: טמפרטורות קריטיות כתלות בזרם

כאשר הזרמים לא נשלטו באופן ישיר, אלא שונו לגדלים שונים וערכם הוערך לפי התאמה להתנגדות שהתקבלה לפי חוק אום למדידה של $100mA$ ו- $10mA$ (ממוצע שלהם) $- R = 9 \cdot 10^{-4} \Omega$. זרמים אלו גם שונו בהתאם לממוצע.

נציין כי האקסטרפולציה עבור $99.6mA$ נלקחה החל מ- $80.5K$ ועבור $91.4mA$ החל מ- $80.6K$. עבור $123.7mA$ לא בוצעה הערכה לטמפרטורה הקריטית כי הנקודות שנלקחו רק מתחילת מעבר הפאזה, עם הרבה נקודות "לא טובות" כפי שרואים באיור והאקסטרפולציה בהתאם נתנה תוצאה מאוד רחוקה מהערך המצופה, ביחס לזרמים האחרים. לכן התעלמנו ממדידה זו.

לפי מקור [4] מכשיר ה-Mr. SQUID בעל מוליך-על YBCO, והוא לפי מקור [5] בעל טמפ' קריטית של $93K$.

ביצענו התאמה לנקודות בטבלה 2 לפונקציה $y = ax^2 + bx + I_0$ וקיבלנו:

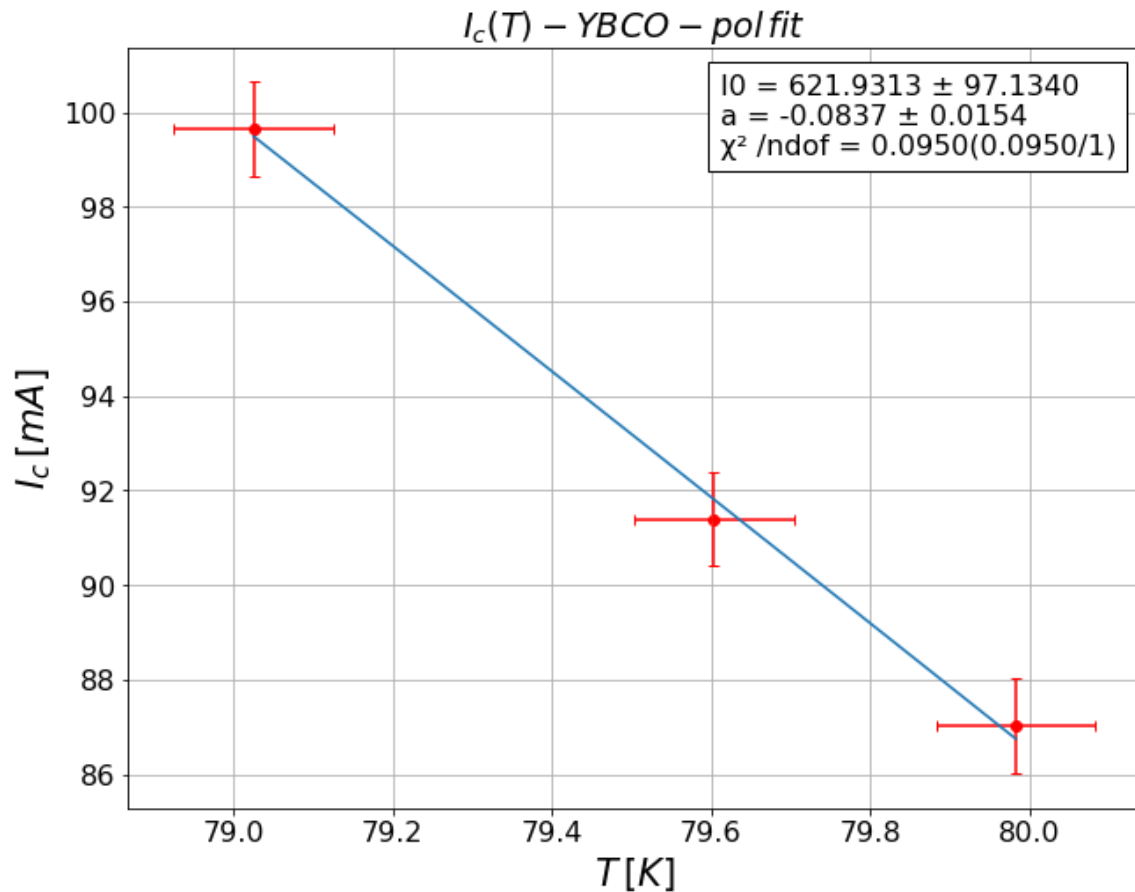


איור 18: התאמה ל-3 נקודות ראשונות

כאשר מהקשר $T_c = \sqrt{\frac{I_0}{a}}$ נקבל את תוצאתינו: $T_c = (81 \pm 4)K$. כאשר האי ודאות חושבה על ידי נגזרות חלקיות.

לתוצאות אלו נחשב את ההתאמות: $t = 3\sigma$ ו- $\Delta_{rel} = 12.9\%$.

נראה כי המגמה בשלושת הנקודות הראשונות תיתן הערכה מדויקת יותר, לכן בדקנו גם בנפרד התאמה לינארית עבורם:



איור 19: התאמה חלקית לזרם כתלות בטמפרטורה

עבור התאמה זו נקבל באותה הדרך תוצאה של: $(86 \pm 10)K$.

4.6 דיון בתוצאות ומסקנות

- הצלחנו לקבל מוליך-על פועל, כפי שראינו על ידי ריחוף המגנט מעליו (מאפקט מייזנר) וכפי שראינו באיור 16 כי עד טמפרטורה מסויימת החומר היה עם התנגדות בקירוב אפסית. אמנם, בחלק מהזרמים לא הצלחנו להגיע לאיפוס התנגדות, אבל המגמה בהם זהה לאלו שכן התאפסו.
- ההתאמה באיור 18 יצאה סבירה, עם $\frac{\chi^2}{NDOF} = 0.86$. מראה על הערכת אי ודאויות מתאימות (מעט גדולות מדי).
- התוצאה $T_c = (81 \pm 4)K$ הינה התאמה גבולית, עם התאמה 3σ ושגיאה יחסית של 12.9%. תוצאה זו לפי שתי המדדים פחות מדוייקת מניסוי ה-Mr. SQUID. אנו מעריכים כי גורם משמעותי הוא העובדה שמוליך העל שהכנו אינו אידיאלי ופחות איכותי מזה שמופיע במכשירים כמו Mr. SQUID ולכן אפקטיבית הטמפרטורה הקריטית של מוליך העל שלנו מצופה להיות נמוכה מזו של YBCO שהוכן באופן תעשייתי.

- עבור שלושת הנקודות הראשונות קיבלנו התאמה טובה יותר עם מדדים: $t - value = 0.9\sigma$ ו- $\Delta_{rel} = 7.5\%$. אמנם אין הצדקה מוחלטת להתייחס רק לטמפרטורות הנמוכות, אבל זה מעלה חשד וכיוון אפשרי להעמקה – אפקטים המשפיעים על התוצאות בצורה קיצונית יותר בטמפרטורות גבוהות.

5. ניסוי הרחבה - BSCCO

5.1 מטרות הניסוי

מטרת הניסוי הינה להצליח לבנות דסקה של BSCCO שתאפשר פאזת מוליכות-על ומדידת הטמפרטורה הקריטית שלה.

5.2 תיאור המערכת

המערכת זהה למערכת בניסוי 3, פרט לחומרים מהם נרכיב את המוליך-על: Bi_2O_3 , $SrCo_3$, $CaCo_3$, CuO .

5.3 מהלך הניסוי

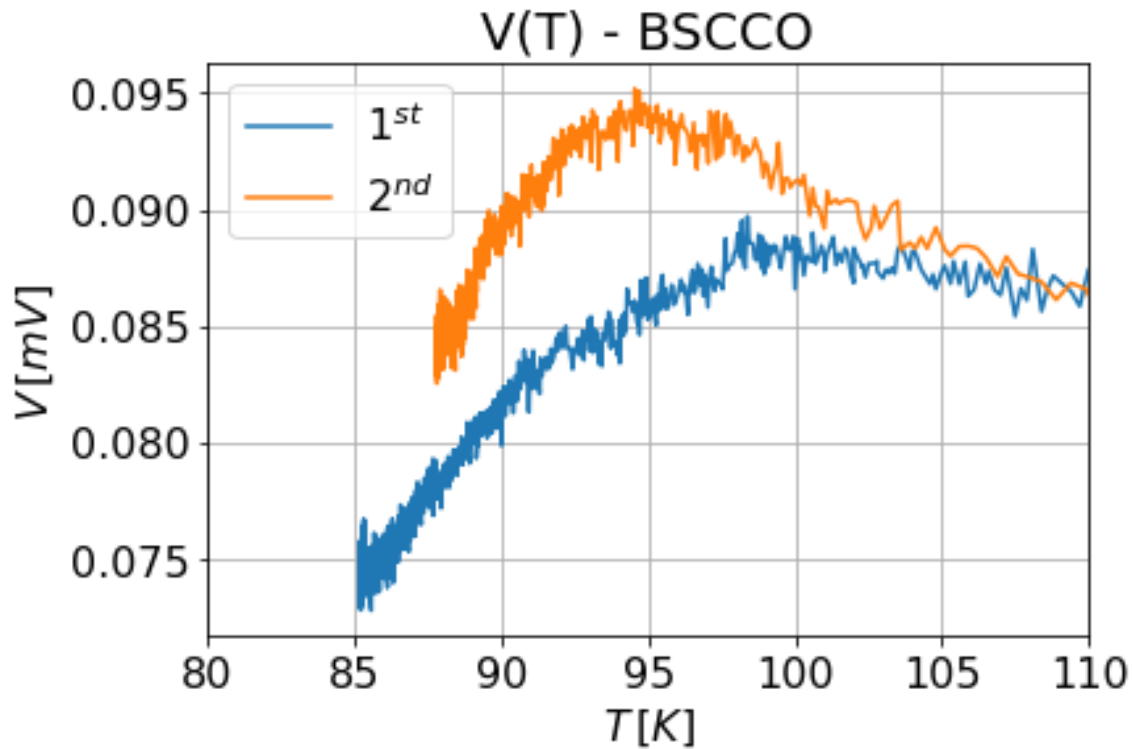
מהלך הניסוי זהה למהלך ניסוי 3, פרט לשינוי החומרים, הכמות שלהם וטמפרטורת החימום –

- לקחנו $5.37g$ של Bi_2O_3 , $3.32g$ של $SrCo_3$, $1.12g$ של $CaCo_3$ ו- $1.79g$ של CuO .
- חיממנו ל- $790^{\circ}C$ ליממה, אחר כך ל- $810^{\circ}C$ ליממה, אחר כך ל- $830^{\circ}C$ ליממה, כאשר אנחנו בוחשים ומערבבים בין חימום לחימום.
- הכנו דיסקה מהאבקה תחת דחיסה ב- $10\ ton$ והכנסנו אותה ל- $855^{\circ}C$ ליממה נוספת.
- את הדיסקה הכנסנו למתקן וחזרו על פעולות המדידה כמתואר בניסוי 3.

5.4 תוצאות הניסוי

ניסינו לבדוק ריחוף מגנט מעל הדיסקה, בדומה לאיור 16, אך ללא הצלחה. מה שכבר מראה על מוליך-על שהוכן ללא הצלחה מלאה.

להלן שתי המדידות של מתח כתלות בטמפרטורה (שהצליחו) שקיבלנו:



איור 20: מתח כתלות בטמפרטורה, BSCCO

כאשר הזרמים של המדידות ב- $100mA$.

5.5 עיבוד תוצאות

בדומה למדידה שפסלנו בניסוי הקודם, נלקחו נקודות רק בתחילת פאזת המעבר ולכן אין ביכולתנו לתת הערכה לטמפרטורה הקריטית. אם בכל זאת ננסה לבצע אקסטרפולציות (החל מ- $95K$ לכחול ו- $94K$ לכתום) נקבל טמפרטורות קריטיות של $5.9K$ ו- $30.8K$ בהתאמה. זאת בנוסף לעוד 3 מדידות נוספות שנלקחו, בהן לא התקבלה אפילו מגמת ירידה שעבורה היה ניתן לקרב על ידי אקסטרפולציה.

5.6 דיון בתוצאות ומסקנות

- ל-BSCCO יש מספר תרכובות שונות עם טמפרטורות קריטיות שונות, התלויות בכמות אטומי החמצן במולקולה. המוליך על שאנחנו הכנו הינו ה- 2212 phase אשר תואם לטמפרטורה קריטית של $96K$, לפי מקור [3].
- הטמפרטורות הקריטיות שהתקבלו באקסטרפולציה לא קרובות אפילו לתאר את הצפי התיאורטי וגם לא התקבלו מספיק נקודות להתאמת פונקציה כפי שעשינו עם ה-YBCO. לכן לצערינו לא הצלחנו ליצור מוליך-על מספיק טוב לקבלת תוצאות והערכת טמפרטורה קריטית. מה שמתיישב עם העובדה שלא הצלחנו לגרום למגנט לרחף מעליו.
- כן נשים לב כי האיזור הטמפרטורה הקריטית הספרותית, קיבלנו שינוי פאזה ודעיכה בהתנגדות בפרט. זאת אומרת שכנראה החומר הסתדר חלקית בקונפיגורציה הנדרשת למוליכות-על, כך שכנראה כן מדדנו תכונות של מוליכות-על, רק בצורה לא מלאה.

6. סיכום ומסקנות

- למדנו והכרנו את פאזת מוליכות-העל ותכונותיה.
- הצלחנו לבנות אחד (YBCO) ולמדוד את הטמפרטורה הקריטית שלו: $T_c = (81 \pm 4)K$.
- הצלחנו להפעיל את מערכת Mr. SQUID ולמדוד את הטמפרטורה הקריטית של YBCO להיות: $T_c = (91.9 \pm 0.5)K$. תוצאה מדויקת יותר וקרובה יותר לערך הספרותי מניסוי ה-YBCO.
- הצלחנו למדוד את התלות המחזורית של המתח בשטף המגנטי בצמתי ג'וזפסון ולקשר את מחזוריותו לפלאקסון. מדדנו את האופי הבדיד את יחידת שטף מגנטי, והוא יצא לנו $\Phi_0 = (1.6 \pm 0.2)fWb$.
- בנינו מוליך-על BSCCO מסוג 2122, אך ללא הצלחה בהפיכתו למוליך-על. כן הצלחנו להבחין בתכונות של הורדת התנגדות בסביבות הטמפרטורה הקריטית הספרותית.

7. הצעות לשיפור הניסוי

- שיטה/מכשור לקירור המוליך-על בצורה מבוקרת יותר ישפר את איכות הניסוי. יוכל לזרז את זמני ההמתנה בקירור וגם יספק אפשרות לחמם את המערכת בצורה שאינה מהירה מדי – כך שנוכל להתייחס למדידות תוך כדי התחממות בדיוק רב יותר.
- מכשיר ספק זרם שנותן ערכי זרם מדויקים יפשט את עיבוד הנתונים ויקטין את אי-הודאות שנגרמת מחישוב הערכת הזרם לפי חוק אום.

8. רשימת מקורות

[1] תדריכי ניסוי 'מוליכות-על', אוניברסיטת בן-גוריון

<https://moodle.bgu.ac.il/moodle/mod/page/view.php?id=2091744>

Yttrium barium copper oxide, Wikipedia [2]

https://en.wikipedia.org/wiki/Yttrium_barium_copper_oxide

Bismuth strontium calcium copper oxide, Wikipedia [3]

https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth_strontium_calcium_copper_oxide

Mr. SQUID Manual [4]

https://web.physics.indiana.edu/courses/p451/experiments/SQUID_expt.pdf

Finding the critical temperature of a YBCO superconductor using a voltage probe, [5]

Frank King

https://physics-archive.wooster.edu/JrIS/Files/King_web_article.pdf

[6] איורים:

איור 1 : Oxide and Metallic Precursor Powders for Superconducting, Zhang, Yun

איור 2 : מצגת - Cooper Pairs, Superconductivity and Flash Mobs, PHYS 498 ART Spring - 2018

Karmela Padavić

איור 3 : SQUID Magnetometer - A Study, Integrated BS-MS Student, Semester II, 2020-25 Batch, Indian Association for the Cultivation of Science, Jadavpur, Kolkata, 700032, India

איור 4 : Lawrence Berkeley National Laboratory – News Center

<https://newscenter.lbl.gov/2002/01/23/pointing-the-way-to-granular-superconductivity-/in-bscco>