חיזוי אפיין *I-V* והתפלגויות הזרם, השדה המגנטי והשדה

החשמלי בסלילים מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות

יוסף אורי עדני

מוגש כחלק מן הדרישות לקבלת תואר "מוסמך" במחלקה לפיסיקה,

אוניברסיטת בר אילן

אוגוסט 2005

אב תשס"ה

רמת גן

תוכן העניינים

| תקציר | | 3 |
|------------|-------------------------------------|------|
| פרק 1. | מבוא | 5 |
| | 1.1 הקדמה | 5 |
| | 1.2 רקע - מוליכות על | 7 |
| | 1.3 מטרות העבודה | 18 |
| פרק 2. | תיאור המערכת הניסויית ותהליך המדידה | 20 |
| | 2.1 תרשים המערכת | 20 |
| | 2.2 ציוד היקפי ועזרים | 23 |
| | 2.3 השיטה ותהליך המדידה | 24 |
| | 2.4 דיוק המדידות | 25 |
| | 2.5 מערכת מדידה במעגל סגור | 26 |
| פּרק 3. | המודל החישובי | 29 |
| | 3.1 תיאור הסליל | 29 |
| | 3.2 תרשים זרימת המודל | 31 |
| פרק 4. | תוצאות ודיון | 35 |
| | 4.1 תוצאות המדידות הניסיוניות | 35 |
| | 4.2 תוצאות הסימולציה | 47 |
| פרק 5. | סיכום ומסקנות | 55 |
| רשימת מקור | רות | 57 |
| Abstract | | I-II |

תקציר

גילויה של תופעת העל-מוליכות בטמפרטורות גבוהות פתחה צוהר ליישומים טכנולוגים רבים. אחד היישומים העיקריים הנמצאים בשלבי מחקר ופיתוח מתקדמים הינם מגנטים רבי עצמה המסוגלים לשאת זרמים גבוהים מאוד בהשוואה למוליכים קונבנציונאליים. אולם, בחומרים אלו צפיפות הזרם הקריטי בפאזה העל-מוליכה תלויה בשדה המגנטי, וזה הנוצר ע"י הסליל עצמו משפיע באופן דרמטי על עוצמת הזרם המקסימאלי שניתן להזרים בסליל.

חוטים המשמשים ליצירת מגנטים חשופים לשדה מגנטי עצמי חזק ולא הומוגני המשתנה לרוחב החוט. שדה עצמי זה בעייתי במיוחד במגנטים הנוצרים ע"י ליפוף חוטים מוליכי על בטמפרטורות גבוהות, הן בגלל האניזוטרופיה של החוטים (הם רחבים ושטוחים מן הרגיל) והן בגלל האניזוטרופיה של החוטים (הם רחבים ושטוחים מן הרגיל) והן בגלל האניזוטרופיה של החוטים (מנו עשויים הגיאומטריה של החוטים (הם רחבים ושטוחים מן הרגיל) והן בגלל האניזוטרופיה של החוטים (פגמים, מבנו עשויים אלה, אניזוטרופיה הגורמת להשפעה תלוית כיוון של השדה המגנטי. התפלגות צפיפות הזרם המקומית חוטים אלה, אניזוטרופיה הגורמת להשפעה תלוית כיוון של השדה המגנטי. התפלגות צפיפות הזרם המקומית בחוטים אלה, אניזוטרופיה החוט (פגמים, מבנה בחוט נקבעת ע"י התפלגות השדה המגנטי יחד עם האניזוטרופיה החוט (פגמים, מבנה וכד'). התלות של צפיפות הזרם הקריטי בעוצמת השדה המגנטי יחד עם האניזוטרופיה החוס (פגמים, מבנה וכד'). התלות של צפיפות הזרם הקריטי בעוצמת השדה המגנטי יחד עם האניזוטרופיה החוס (פגמים, מבנה וכד'). התלות של צפיפות הזרם הקריטי בעוצמת השדה המגנטי יחד עם האניזוטרופיה החוסי (פגמים, מבנה'). התלות של צפיפות הזרם הקריטי בעוצמת השדה המגנטי יחד עם האניזוטרופיה החוס (פגמים, מבנה וכד'). התלות של צפיפות הזרם הקריטי בעוצמת השדה המגנטי יחד עם האניזוטרופיה החוסי השלי השדה המגנטי וודי עם העלות של צפיפות הזרם הקריטי בעוצמת השדה המגנטי יחד עם האניזות הזרם, השדה החשמלי השדה המגנטי ואפיין I-V של הסליל, לבעיה מורכבת המקשה על תכנון ובקרה על פעולתו. לכן, המטרה העיקרית של עבודה זו הינה חיזוי אפיין I-V של סלילים המלופפים מחוטים מוליכי על מסחריים של עבודה זו הינה חיזוי אפיין I-V של סלילים המלופפים מחוטים מוליכי על מסחריים של עבודה זו הינה חיזוי אפיין I-V, החשופים לשדה מגנטי אי-הומוגני, תוך ניתוח פרטני של התפלגויות החונות היים בסליל.

I-V לצורך השגת מטרה זו בנינו מערכת ניסיונית, שבעזרתה חקרנו את השפעת שדה מגנטי **הומוגני** על אפיין *I-V* של **סרט** ב- 77 K בחוט יחיד והשתנותם של סרט ב- 77 K בחוט יחיד והשתנותם מתוארות מדידות אפייני על הישור החוט בחוט יחיד והשתנותם כתוצאה משדה מגנטי בעוצמות ובכיוונים שונים ביחס למישור החוט בטמפרטורה 77 K. מדידות אלה מראות כי הזרם הקריטי בחוט וחדות אפיין I-V דועכים באופן מונוטוני עם הגדלת עצמת השדה המגנטי החיצוני ועם

הטייתו לציר המאונך למישור החוט. אולם, שלא כמו בגביש יחיד של החומר המרכיב את החוט, שדה מגנטי המקביל למישור החוט גורם לדעיכה לא זניחה בזרם הקריטי ובחדות האפיין של החוט. שוני זה קשור במבנה ובפיזור גבישי החומר בחוט, ומקורו נדון בהרחבה.

המדידות הניסיוניות בחלקה הראשון של העבודה משמשות לנו כבסיס נתונים לחלקה השני בו מתואר מודל ה נומרי, הפותר את בעיית חיזוי עקומת I-V של סליל הנמצא תחת השפעת שדה מגנטי אי-הומוגני. במודל זה אנו מתבססים על ההנחה כי השדה המגנטי האי הומוגני ניתן לתיאור ע"י חלוקה לשדה מגנטי הומוגני במקטעים קטנים דיים. הנחה זו מאפשרת להשתמש בנתונים שנתקבלו מהמדידות עבור חוט בודד בשדה הומוגני ולהחילם על אזורים מסוימים בסליל.

ע"י חישוב רקורסיבי של התפלגות השדה המגנטי תוך שימוש בחוק ביו-סבר, וחישוב התפלגות הזרם בסליל באמצעות הנתונים הניסיוניים והתנאים הפיסיקליים בהם שרוי הסליל, אנו מצליחים לשחזר את אפיין I-V של הסליל, ואת התפלגויות הזרם, השדה המגנטי והשדה החשמלי על פני כל הסליל. חשיפת נקודות התורפה של הסליל בהם מתפתח מתח חשמלי גבוהה מאפשר לתכנן עבודה תקינה ורצופה של סלילים על-מוליכים. הסליל בהם מתקבלות במודל מושוות למדידות אפיין I-V של סלילים שונים וההתאמה בין הניסיון לסימולציה גבוהה מאוד.

מודל זה מהווה צעד נוסף וחשוב בתכנון ובבניית סלילים על-מוליכים ליישומים מדעיים וטכנולוגים בכך שהינו שופך אור על המתרחש בסליל עת הוא נושא זרם כלשהו, ומאפשר לראשונה לצפות בדיוק גבוהה את ביצועי הסליל ולשפרם טרם ליפופו.

פרק 1

מבוא

הקדמה:

אחת התגליות הגדולות של המאה העשרים הינה גילויה של תופעת העל-מוליכות. בשנת 1911, כשלש שנים לאחר שהשיג את היכולת לנזל הליום, גילה ¹Onnes כי ההתנגדות החשמלית של כספית נעלמת כשזו מקוררת ל- K למרות גילוי מרעיש זה, יישומה של תופעת העל-מוליכות בשוק האנרגיה לא התפתח לממדים רחבים במשך עשורים בשל העלויות הגבוהות והאנרגיה הרבה הדרושות לקירור עד לטמפרטורות נמוכות ביותר של הליום או מימן נוזלי.

אחד השימושים העיקריים במוליכי על כיום הנו בייצור מגנטים המסוגלים להפיק שדות מגנטיים גבוהים מאוד ביחס למוליכים רגילים וזאת בשל היכולת להעביר זרמים גבוהים מאוד במגנטים אלה בגיאומטריית סליל ביחס למוליכים רגילים וזאת בשל היכולת להעביר זרמים גבוהים מאוד במגנטים אלה בגיאומטריית סליל קומפקטית. ברם, על מנת ליצור מגנט יעיל, יש לדעת את הזרם המכסימלי שניתן להעביר דרכו. כאשר מדובר בסלילי *HTS* בכלל, ובחומר *BSCCO-* המתאים ביותר כיום ליצירת יישומים יעילים בפרט, התפלגות הזרם המקומית בחוט אינה אחידה בגלל חשיפה בעוצמות שונות לשדה המגנטי העצמי של הסליל.השדה המגנטי הנו המקומית בחוט אינה אחידה בגלל חשיפה בעוצמות שונות לשדה המגנטי העצמי של הסליל.השדה המגנטי הנו המקומית בחוט אינה אחידה בגלל חשיפה בעוצמות שונות לשדה המגנטי העצמי של הסליל.השדה המגנטי הנו גורם המקומית בחוט אינה אחידה בגלל חשיפה בעוצמות שונות לשדה המגנטי העצמי של הסליל.השדה המגנטי הנו המקומית בחוט אינה אחידה בגלל חשיפה בעוצמות שונות לשדה המגנטי העצמי של הסליל. השדה המגנטי הנו המקומית בחוט אינה אחידה בגלל חשיפה בידר שנחדר לשדה המגנטי הערם המקטימאלי היכול לעבור גורם המשפיע מאוד על צפיפות הזרם הקריטי J_c , ולפיכך, קשה לחזות את הזרם המקטימאלי היכול לעבור בסליל, ומתוך כך את ביצועי הסליל. בעיה זו קיימת ב- *HTS (*להבדיל מ- *LTS*) בשל האקטיבציה התרמית הגבוהה הכרוכה בעבודה בטמפרטורות גבוהות.

חוטים מוליכי-על המשמשים במגנטים מוליכי-על חשופים לשדה חזק המשתנה על פני שטח החתך של החוט. בתנאים אלו התפלגות הזרם בחוט תהא מוכתבת ע"י התכונות המקומיות של החוט (פגמים ומבנה) וע"י השדה המגנטי העצמי והחיצוני. התלות החזקה של הזרם הקריטי בשדה יחד עם האניזוטרופיה הגבוהה של תכונות החוט ב-HTS הופכות את בעיית חיזוי התפלגות הזרם בקונפיגורצית סליל מסויימת לבעיה סבוכה. השדה בעל מוליך המתקבל מתצורת ליפוף כלשהי תלוי בהתפלגות הזרם בעל מוליך וזו מצידה תלויה בשדה ומכיוון שהשדה לא הומוגני במרחב הסליל כל ליפוף יראה תכונות שונות. כדי לדעת לפני ליפוף הסליל את ביצועיו, חייבים קודם לפתור את בעיית התפלגות הזרם והשדה המגנטי בחוט. נכון להיום נדרש כלי המציע חיזוי של חייבים קודם לפתור את בעיית התפלגות הזרם והשדה המגנטי בחוט. נכון להיום נדרש כלי המציע חיזוי של אפיין הסליל (*I-V*) לפני בנייתו. בעלות הגבוהה של חוטי HTS (כ- 300 למטר) כלי כזה יכול לשפר את תכנון הסליל, לחשוף נקודות תורפה, להגדיל את נצילות החוט ולחסוך עלויות רבות כמו גם להבין את השפעת השדה העצמי על ערכו של הזרם הקריטי בסליל.

בעבודה זו נציע כלי חישובי, אשר בשילוב עם נתונים ניסיוניים, מסוגל לנבא התנהגות סלילים מוליכי על HTS. עבודה זו מהווה צעד נוסף בתהליך יצירת סלילים מוליכי על יעילים, כך שיהיו כדאיים לתעשיית מוליכי העל המתעתדת להיכנס לשימוש בשוק האנרגיה בשנים הקרובות.

רקע - מוליכות על

(Type I) I אוליכי-על מסווגים לשני סוגים בסיסיים ע"פ התנהגותם בנוכחות שדה מגנטי. מוליכי-על מסוג (Type II) מוליכי-על מסוג שני (Type II) כוללים מתכות טהורות כדוגמת טיטניום, אלומיניום, בדיל ועופרת, לעומת מוליכי על מסוג שני סוג שני הכוללים בעיקר סגסוגות של מתכות דוגמת Nb-Ti או Nb-Ti או קראמיות אחדות. לשני סוגי מוליכי העל תכונה בסיסית: כאשר הם מקוררים אל מתחת לטמפרטורה מסוימת (T_c) התנגדותם החשמלית נעלמת.

(Type I Superconductors) מוליכי על מסוג ראשון

סוג זה מתואר היטב ע"י תיאורית *BCS*. עקרון המפתח בתיאוריה זו, הנו הזיווג של האלקטרונים הקרובים לרמת פרמי תוך אינטראקציה עם אטומי הגביש. כמו כן סוג זה של מוליכות-על מציג את תופעת מייזנר באופן מדויק, דהיינו כאשר מופעל על החומר שדה מגנטי מתחת לערך קריטי מסוים (B_c) , דוחה לחלוטין מוליך-העל מדויק, דהיינו כאשר מופעל על החומר שדה מגנטי מתחת לערך קריטי מסוים שוליכות-געל נעלמת והחומר עובר למצב את השטף המגנטי מתוכו. מעל ערך זה של שדה מגנטי תופעת מוליכות-גערים מוליכות-געל מציג את תופעת מייזנר באופן מדויק, דהיינו כאשר מופעל על החומר שדה מגנטי מתחת לערך קריטי מסוים מסוים שוליכות לחלוטין מוליך-העל מדויק. את השטף המגנטי מתוכו מעל ערך זה של שדה מגנטי תופעת מוליכות-העל נעלמת והחומר עובר למצב מוליכות נורמאלי. ערכו של השדה הקריטי *B*

(Type II Superconductors) מוליכי על מסוג שני

תרומה משמעותית ביותר לתיאוריה של מוליכות-על נעשתה ע"י Abrikosov בשנת 1957, כאשר פרסם 7 I מאמר המתאר תופעה חדשה הקשורה לתיאורית גינזבורג-לנדאו, שאיננה מופיעה במוליכי-על מסוג 7 I מאמר המתאר תופעה חדשה הקשורה לתיאורית גינזבורג-לנדאו, שאיננה מופיעה במוליכי-על מסוג קר. במאמר זה חשף חומרים חדשים, המקיימים עלייה רציפה של שטף מגנטי החודר לתוך מוליך העל משדה קריטי תחתון B_{c2} , עד אשר מגיע לערך מקסימאלי $B = \mu_0 H$ בשדה קריטי עליון B_{c2} , במקום להראות מעבר חד למצב נורמאלי בשדה קריטי מאחר יותר התברר כי תופעה זו איננה נובעת כתוצאה מפגמים במבר חד למצב נורמאלי בשדה קריטי אלא מדובר בתופעה חדשה לחלוטין שבגינה סווגו החומרים החדשים כמוליכי-על מסוג ווג מעבר חד למצב נורמאלי בשדה קריטי אלא מדובר בתופעה חדשה לחלוטין שבגינה סווגו החומרים החדשים כמוליכי-על מסוג II.

באיור 1.1 ניתן לראות את השתנות המגנטיזציה כפונקציה של השדה המגנטי החיצוני במוליכי על. הקו המקוור מפריד בין שני המצבים של *Type I* (מייזנר והנורמאלי) והקווים הרציפים מפרידים בין שלשת המצבים השונים של *Type II* (מייזנר, מעורב והנורמאלי).



II איור 1.1: השתנות המגנטיזציה כפונקציה של השדה המגנטי במוליכי על מסוג

בעוד שכל מוליכי-העל מסוג I הינם מתכות טהורות בלבד, מוליכי-על מסוג II יכולים להיות סגסוגות של מתכות או מתכות טהורות כמו ניאוביום (Nb), ואפילו חומרים קראמיים מסוימים. הטמפרטורה הקריטית מתכות או מתכות והסגסוגות הינה (Nb), ואפילו חומרים קראמיים מסוימים. הטמפרטורה הקריטית LTS - מתכות או מתכות והסגסוגות הינה מתחת ל-30~K ומסווגות כמוליכי-על בטמפרטורות נמוכות הינה T_c של כל המתכות והסגסוגות הינה (Low Temperature Superconductors) אוילו הטמפרטורה הקריטית של התרכובות הקראמיות הינה (High Temperature) -HTS מעל ל-30~K והן מסווגות כמוליכי-על בטמפרטורות נמונות הינה מעל ל-10~K והן מסווגות כמוליכי-על הישאר במצב מוליכי-על מסוג ווה מנה הינה (גער מסוג הינה גבוהות הינה הקריטית של התרכובות הקראמיות הינה מעל ל-10~K והן מסווגות כמוליכי-על בטמפרטורות גבוהות גבוהות מנה מסוג ווהן מסווגות מעל ל-10~K והן מסווגות כמוליכי-על מסוג II הנו היכולת להישאר במצב מוליכות-על תחת שדה מגנטי חיצוני גבוה מאוד בהשוואה למוליכי על מסוג II הנו

(The mixed state) המצב המעורב

שריג הנקרא "שריג פלקסונים". כיוונו של השטף המגנטי בכל פלקסון מקביל לשדה החיצוני, כך שנוצרים זרמי מיסוך וזרמים מושרים באופן שהחומר שומר על דיאמגנטיות (ראה איור 1.3 א').

Abrikosov $B_{c1} < B < B_{c2}$: המצב המעורב הנו כאמור מצב ייחודי למוליכי על מסוג **H** ומתקיים בתחום: חזה כי השטף המגנטי חודר במערך מסודר של קווי- שטף, וכל קו שטף מכיל קוונט אחד של שטף מגנטי הנתון במשוואה 1.1:

1.1
$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.067 \times 10^{-15} Weber$$

מספר שנים אחרי Abrikosov, המגנטיזציה של מוליכי על מסוג II תוארה באופן ניסיוני ע"י Abrikosov, מספר שנים אחרי אחרי אחרי המגנטיזציה של מוליכי על מסוג Bean הציע מודל מקרוסקופי של התפלגות הזרם והשטף המגנטי והראה כי התפלגות השטף אינה אחידה. גילה, כי ישנו גרדיאנט של השטף המגנטי ובמרכז הדגם ישנו אזור החופשי משטף. המודל נקרא מודל המצב הקריטי (*Critical state model*), והינו מודל שימושי ביותר להבנת ההתנהגות המגנטית של מוליכי-על מסוג II.

תנועת פלקסונים- הפסדי אנרגיה

ליצירת יישומים יעילים נדרשים מוליכי על אשר מסוגלים לשאת זרמים גבוהים ככל שניתן ללא הפסדים. מצב העבודה של רוב ההתקנים מוליכי על הנו המצב המעורב על כן נתייחס עתה למקרה שבו זורם זרם בתוך על מוליך מסוג II כשהוא נמצא במצב זה. אינטראקציה בין הזרם לקוי השטף המגנטי יוצרת מצב בו הזרם מפעיל כח לורנץ על כל קו השטף בכיוון המאונך לזרם ולקווי השדה שניתן לבטאו במשוואה 1.2:

$$I.2 F_{\rm L} = \frac{1}{c} (\Phi_0 \times \mathbf{j})$$

במקרה בו קווי השטף "חופשיים", כח לורנץ יגרום לתנועה של קווי השטף בתוך מוליך העל. תנועת קווי השטף גורמת לאובדן אנרגיה תוך העברת זרם, כלומר להתנגדות חשמלית סופית¹⁰. עובדה זו נובעת ממשוף גורמת לאובדן אנרגיה תוך העברת זרם, כלומר שינוי השדה המגנטי תגרום להופעת שדה חשמלי בדגם שמשמעו לפי ההגדרה- התנגדות חשמלית הנתונה במשוואה 1.3: (להרחבה ראה ^{11,2}):

1.3
$$\rho \propto \rho_n \frac{B}{B_{c2}}$$

בעל מוליך ממשי קיימים תמיד מחסומי לכידה לתנועת קווי השטף (Pinning barriers). המחסומים הפשוטים ביותר הינם פגמים או זיהומים בחומר בהם "כדאי" לקו השטף להימצא, שכן הוא אינו צריך הפשוטים ביותר הינם פגמים או זיהומים בחומר בהם "כדאי" לקו השטף להימצא, שכן הוא אינו צריך "לשלם" את מלוא אנרגיית העיבוי ליצירת אזור נורמלי. קו שטף זה יכול להיחשב מבחינה אנרגטית כלכוד "לשלם" את מלוא אנרגיית העיבוי ליצירת אזור נורמלי. קו שטף זה יכול להיחשב מבחינה אנרגטית כלכוד "לשלם" את מלוא אנרגיית העיבוי ליצירת אזור נורמלי. קו שטף זה יכול להיחשב מבחינה אנרגטית כלכוד ע"י בור פוטנציאל בעומק J_c וא גורם לכח לורנץ- F_L , להוציאו מהבור כמתואר באיור 1.2 ב'. תנועה זו של קווי שטף נקראת "זרימת שטף" היורנץ, לורנץ- J_c (flux-flow), להוציאו מהבור כמתואר באיור נורמית (אור ליד ליד ליד ליד ליד הפסדים ובפאזת מוליך-על. ב- HTS), והינו מאפיין חשוב מאוד, כיוון שהוא מצביע על מקסימום הזרם היכול לעבור בעל- מוליך ללא הפסדים ובפאזת מוליך-על. ב- http:// דימת שטף מסוימת נובעת מפלקטואציות תרמיות של שריג הפלקסונים כאשר הפלקסונים נמצאים בתוך מרכזי הלכידה , אך זרימה זו איטית יותר ואקראית והיא נקראת "זחילת- שטף".



איור א1.2: המצב המעורב- שריג הפלקסונים כאשר כל פלקסון הנו אזור נורמאלי המוקף בזרם על-מוליך. זרמי השפה משמרים את תכונת הדיאמגנטיות של החומר¹.



איור ב1.2: מנגנון זרימת-שטף. אינטראקציה בין הזרם לשדה המגנטי יוצרת כוח לורנץ, הגורם להטיית בורות הפוטנציאל, ומאפשר זרימת פלקסונים¹. למעלה- *J=0.5Jc* אין זרימת פלקסונים, באמצע- *J=0.5Jc* כוח לורנץ עדיין קטן מה-*pinning* וחלק מהפלקסונים מדלגים אקראית מבור אחד למשנהו. למטה-בזרם קריטי הכוחות משתווים וישנה זרימה חופשית של פלקסונים.

(HTS) מוליכי על בטמפרטורות גבוהות

HTS הינן תחמוצות קראמיות גבישיות והתנגדותם בטמפרטורת החדר גבוהה בשני סדרי גודל לערך מהתנגדות נחושת.

בטבלה 3 מובאים ערכים קריטיים של חומרי HTS. מטבלה זו נראה באופן בולט כי לחומר YBCO בטבלה 3 מובאים ערכים קריטיים של חומרי הישומים הדורשים זרמים חזקים, אך חסרונו הגדול הוא יתרונות רבים על פני החומרים האחרים ליצירת יישומים ארוכים מחומר זה. חוטים מחומר זה צפויים לעובדה שעדיין אין טכנולוגיה המסוגלת לייצר חוטים ארוכים מחומר זה. חוטים מחומר זה נרחב להופיע בדור השני של החוטים ושימוש נרחב בהם נראה רק בעתיד היותר רחוק.

Bi- - בטבלה 1.1 מובאים מספר פרמטרים קריטיים המאפיינים חומרי HTS. מהטבלה ניתן לראות כי ל 2223 יתרון בצפיפות הזרם על פני Bi-2212 ולכן הנו המועדף ליצירת יישומים מוליכי על בטמפרטורות גבוהות בטמפרטורה זו והוא הראשון שנכנס לשימוש ביישומי.

| | YBCO | Bi-2212 | Bi-2223 |
|--------------------------------------|----------|---------|---------|
| $T_{c}(K)$ | 93 | 87 | 110 |
| J_{c} at 4.2K (A/mm ²) | >100,000 | 5,000 | 3,000 |
| $J_c at 77K (A/mm^2)$ | >10,000 | 100 | 500 |

¹⁶. מתקדמים HTS טבלה 1.1: פרמטרים קריטיים של חומרי

(BSCCO) $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{8-\delta}$

מוליכי על מסוג זה משמשים בסיס לכל יישומי HTS large-scale הקיימים. הם נקראים מוליכי על מסוג זה ומוליכים אלה מתאימים בעיקר ליישומים הדורשים העברת זרם גבוה.

תהליך הייצור מבוסס היטב וניתן לייצר חוטים וכבלים ארוכים (מעל קילומטר). מוליכים אלה מיוצרים בשיטת (Powder In Tube). רעשים זרימה של תהליך הייצור מובא באיור 1.4 א'. הזרם במוליכי ESCCO נאלץ לעבור דרך גבולות הגרגירים, מה שמפריע לזרם לנוע, אלא אם כן הגרגירים מיושרים שחד כנגד השני. לכן, ליצירת יישומים יעילים, נדרש מרקם חזק, וככל שהגרגירים יוצרים מרקם יציב מסודר, צפיפות הזרם הקריטי תהיה גבוהה יותר. על מנת להגיע ליעילות העברת זרם מקסימאלית, יש אחד כנגד השני. לכן, ליצירת יישומים יעילים, נדרש מרקם חזק, וככל שהגרגירים יוצרים מרקם יציב מסודר, צפיפות הזרם הקריטי תהיה גבוהה יותר. על מנת להגיע ליעילות העברת זרם מקסימאלית, יש המסודר, צפיפות הזרם הקריטי תהיה גבוהה יותר. על מנת להגיע ליעילות העברת זרם מקסימאלית, יש להעביר את אבקת ESCCO, שהגרגרים מהם היא מורכבת מכוונים אקראית, תהליך גלגול בלחץ המסדר את הגרגרים כך שיהיו מכוונים באופן אחיד כתוצאה מהאניזוטרופיה הגבוהה של הגרגירים. לחץ המסדר חומרים קראמיים שבירים, לכן, על מנת לשפר את תכונותיהם המכאניות החומר מוכנס לתוך צינורית של את הגרגרים כך שיהיו מכוונים באופן אחיד כתוצאה מהאניזוטרופיה הגבוהה של הגרגירים. (מען ביו של הגרגירים לוון צינורית של המרים קראמיים שבירים, לכן, על מנת לשפר את תכונותיהם המכאניות החומר מוכנס לתוך צינורית של המרים קראמיים שבירים, לכן, על מנת לשפר את תכונותיהם המכאניות החומר מוכנס לתוך צינורית של בתהליך זה מתקבל חוט בעל חתך צד מלבני, סיבי החומר העל מוליך מוקפים בכסף, רוחב החוט נע בין 2 ל- 4 מילימטר ועוביו בתחום 20.4 מילימטר (ראה איור 12.1 ג').



איור 1.2 א': תיאור סכמאטי של השלבים העיקריים של שיטת PIT ליצירת חוטים על-מוליכים.

.¹⁷Bi-2212 ו- Bi-2223 איור 1.2 ב': תאי יחידה של



.PIT איור 1.2 ג': חתך צד של חוט Bi-2223 רב סיבי כפי שמתקבל בתהליך

תא היחידה של תרכובת זו אינו איזוטרופי (ראה איור 1.2 ב') וכתוצאה מכך תכונות הגביש אינן תא היחידה של תרכובת זו אינו איזוטרופיות לאורך הצירים a ו- c כמו גם תכונות החוט שנוצר בתהליך הערגול. לתאי היחידה מבנה איזוטרופיות לאורך הצירים a ו- b a ו- c כמו גם תכונות החוט שנוצר בתהליך הערגול. לתאי היחידה מבנה תדוסרופיות לאורך הצירים a ו- b (כל שכבה Tetragonal כך שצירי a ו- b אויז בקירוב ל- b א שווים בקירוב ל- b איזוטרופיה של הערבה מדער בתחום ל c - c ביש היום ל c - c שכבה מערכם שנוים בקירוב ל- b שווים בקירוב ל- b איזוטרופיה של c שכום c - c מאריכה בי ה c איזוטרופיה של הערבה c מאריכה בי ה c לערך). לגביש זה תכונה חשובה ביותר והיא אנאיזוטרופיה של c שכם c_2 שנית הזרם הקריטי כאשר מופעל שדה מגנטי על החומר. בעוד ששדה מגנטי במאונך למישור a-b גורם לירידה חדה של J_c שדה מקביל למישור זה בחוט גורם לירידה זניחה. תכונה זו נובעת מהעובדה כי לירידה חדה של J_c שדה מקביל למישור זה בחוט גורם לירידה זניחה. תכונה זו נובעת מהעובדה כי זוימת זוגות האלקטרונים מתרחשת במשטחי Cu-O ונדונה בהרחבה בהמשך.

בנוסף לתאי היחידה של BSCCO יש שתי שכבות של Bi-O שהן מבודדות כך שנוצר צומת על-מוליך-מבודד- על-מוליך, תכונה ההופכת חומר זה למתאים עבור יישומים אלקטרונים⁸.

HTS -זרם קריטי ב-

I-E בצורת של עקומות *I-V* בחומרים מוליכי-על, מקובל להציג תוצאות מדידה בצורת לצורך אפיון שגרתי של עקומות *I-V* בחומרים מוליכי-על, מקובל להציג תוצאות מדידה זו. בנוסף, כאשר E הנו השדה החשמלי הממוצע המתפתח לאורך 1 ס"מ של החוט, וכך יוצגו בעבודה זו. בנוסף, מקרבים עקומות אלה לקשר של חוק חזקה בין המתח המתפתח בחומר לזרם העובר דרכו משתי סיבות עיקריות: פשטותו של חוק החזקה והתאמתו המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב זה השדה החשמלי באור *I* החשמלי המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב אור החשמלי החשמלי המשמלי המשמי המשוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב השדה החשמלי *I* החשמלי *I* החשמלי המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב אור החשמלי החשמלי *I* החשמלי החשמלי המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב אור החשמלי החשמלי *I* החשמלי *I* החשמלי המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב אור החשמלי החשמלי *I* החשמלי *I* החשמלי המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב אור החשמלי *I* החשמלי *I* החשמלי *I* החשמלי *I* המתחים המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב אור החשמלי *I* החשמלי *I* החשמלי *I* המובל המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב אור החשמלי *I* החשמלי *I* המובלים המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי. על-פי קירוב החשמלי *I* החשמלי *I* המתח המצוינת לתוצאות המתקבלות בניסוי.

$$E = E_c \left(\frac{I}{I_c}\right)^n$$

כאשר הקריטריון הנפוץ ביותר הנו $E_c = 1 \mu V / cm$ ובו נשתמש גם בעבודה זו (קריטריון זה נקרא גם I_c כאשר הקריטריון הנדסי" כיוון שלכל צורך מעשי שדה חשמלי הנמוך מ- $1 \mu V / cm$ אינו מפריע ליישומים). I_c הנו הזרם המתאים לקריטריון זה וערכו של n מצביע על חדות המעבר מהפאזה העל-מוליכה לפאזה הנו הזרם המתאים לקריטריון זה וערכו של n מצביע בזרם המעבר מהפאזה העל-מוליכה לפאזה הנו הזרם המתאים לקריטריון זה וערכו של n מצביע קומת מדידה המעבר מהפאזה העל-מוליכה לפאזה הנו הזרם המתאים לקריטריון זה וערכו של n מצביע ל חדות המעבר מהפאזה העל-מוליכה לפאזה הנו הזרם הזרם המתאים לקריטריון זה וערכו של n מצביע קומת מדידה I-t טיפוסית של חוט 77K ניתן לראות באיור למשוואה 1.5

115-140 A ערכים טיפוסיים לפרמטרים הוטי 1
15-223 ב ד-77K בBi-2223ובין ח I_c ובין 15-25 ובין בהתאמה.



איור 1.3: אפיין *I-E* טיפוסי של חוט *Bi-2223* רב-סיבי בשדה עצמי ובטמפרטורה *TK*. הנקודות בגרף הנן תוצאות איור 1.3: אפיין גיפיין ניסיוניות והקו הרציף הנו ההתאמה למשוואה 1.5.

 I_c אדידת מתוך מדידת מחושבת מתוך מדידת צפיפות גפיפות אזרם בסינים אושבת און איזרם בסינים איזרם בסינים און איז

$$I.6 \qquad J_c = \frac{I_c}{S}$$

 J_c לא רק E_c , לא החנו שטח החתך של החוט. השוב לציין כי כאשר משתמשים בקריטריון אחר ל E_c , לא רק משתנה, אלא אף ערכו של n.

כתוצאה ממבנה הגביש, חלק מהפרמטרים החשובים ביותר של חומרי *HTS*, דוגמת ערכו של הזרם כתוצאה ממבנה הגביש, חלק מהפרמטרים החשובים ביחס לכיוון השדה המגנטי המופעל עליהם. J_c וערך החזקה-n, אינם מתנהגים באופן איזוטרופי ביחס לכיוון השדה המגנטי המופעל עליהם. ערכים אלה ובמיוחד J_c משתנים בצורה חדה כאשר משנים את כיוון השדה ביחס לציר c. בתרכובות *שרכים* אלה ובמיוחד, קל יחסית לגדל גבישים ולייצר חוטים כשציר c מוגדר. ברם לצד היתרונות הרבים של תהליך זה, האניזטרופיה מהווה גם חסרון 20.19.18.

האינטראקציה בין השדה המגנטי לזרם גורמת להופעת שדה חשמלי בעל-מוליך וככל שהשדה המגנטי גדל, הזרם הקריטי קטן. עם עלית השדה המגנטי מתעצם כוח לורנץ וקווי השטף יכולים להינתק ממרכזי הלכידה ולנוע בדגם. תנועת קווי השטף גורמת להופעת שדה חשמלי הנתון במשוואה 1.7:

$$1.7 E = B \times v$$

.1.6 כאשר \overline{v} הנה המהירות הממוצעת של קווי השטף. מגמה זו ניתן לראות בבירור באיור



. איור 1.6 איור אפיין *I-E* של HTS. עם העלאת השדה המגנטי קטן הזרם הקריטי ועמו גם חדות העקומה.

כאמור לעיל, Bi-2223 הנו חומר קראמי קשה ושביר. תכונה זו אמנם מבטיחה כי הנו בעל עמידות גבוהה ללחץ, אך עמידותו בפני כיפוף, מתיחה וליפוף, נמוכה. לכן, כאשר מלפפים סליל מחומר זה ישנן מגבלות כמו רדיוס כיפוף מינימאלי ואי יכולת ליפוף ספיראלי. לדוגמא, רדיוס הכיפוף המינימאלי של חוט המיוצר כמו רדיוס כיפוף מינימאלי ואי יכולת ליפוף ספיראלי. לדוגמא, רדיוס הכיפוף המינימאלי של חוט המיוצר ע"י חברת *American Superconductor Corporation* ASC מ"מ. מגבלות אלה הביאו לפיתוח טכניקות דומות ליצירת סלילים שטוחים (*American Superconductor Corporation*) הביאו לפיתוח טכניקות דומות ליצירת סלילים שטוחים (*Pancake coils*) בטכניקת הדבקה ובידוד בין הליפופים. באיור לפיתוח גמר אות ליצירת סלילים שטוחים *Bi-2223* המיוצר ע"י חברת *ASC*, ושל סליל המלופף הליפופים. באיור 1.7 מובאים תצלומים של סרט *Bi-2223* המיוצר ע"י חברת ליקור"- קריאוגניקה הליפופים, עין חרוד (על שיטת ליפוף זו נרשם פטנט).



איור Bi-2223 המיוצר ע"י חברת ASC, וסליל Bi-2223 המיוצר ע"י הברת 1.7 איור 1.7

חוטים מוליכי-על המשמשים בסלילים מגנטים מוליכי-על חשופים לשדה חזק המשתנה על פני שטח החתך של החוט^{22,21}. השדה המקומי המתקבל מתצורת ליפוף כלשהי תלוי בהתפלגות הזרם במוליך וזו מצידה תלויה באופן רקורסיבי בהתפלגות השדה המגנטי על פני מוליך-העל. התלות החזקה של הזרם הקריטי בשדה המגנטי, יחד עם האניזוטרופיה הגבוהה של תכונות החוט ב-HTS, הופכות את בעיית חיזוי עקומת *I-E* של סליל על-מוליך לבעיה סבוכה.

באיור 1.8 מובאת עקומת *I-E* של חוט בודד ושל סליל המלופף מחוט זהה. מהגרף ניתן לראות כי ישנה ירידה של כ-50% בזרם הקריטי כאשר החוט מלופף לסליל.



- 1.7 ב- Bi-2223 ב- Bi-2223 ב- IOR באפוין 100 כריכות, קוטר פנימי וחיצוני 70 ו- 108 איור 1.8: אפיין *I-E* של חוט בודד 140 מ"מ בהתאמה. הזרם הקריטי קטן ב-50% כשהחוט מלופף לסליל.

הסיבה לשינוי דרסטי זה בזרם הקריטי נעוצה בעובדה שהשדה המגנטי העצמי בעל מוליך כשזה מלופף לסליל, איננו זניח והינו הגורם להופעת מתח בזרמים נמוכים יותר.

מטרות העבודה:

- 0- מיפוי עקומות I-E של חוט בודד Bi-2223 ב- Bi-2223 ב- I-E מיפוי עקומות אחיד בתחום 0.35T מיפוי עקומות 0.35T
- ב. חיזוי ההתפלגות הזרם I והשדה המגנטי B לרוחב החוט ולאורך הסליל, בהינתן זרם מסוים (I).
- ג. אפיון התפלגות השדה החשמלי המתפתח לאורך הסליל ומציאת הנקודות בסליל בהן הפסדי האנרגיה הגבוהים ביותר.
 - *.I* פיתוח יכולת חישוב האינדוקציה המגנטית המתקבלת בסליל, בהינתן זרם
- ה. בניית מודל חישובי, המאפשר לחזות את עקומת *I-E* של סלילים המלופפים מחוטים על מוליכים מודל חישובי, *Bi-2223*, ע"י חקירת עקומת *I-E* של חוט בודד והשתנותה כתוצאה משדה מגנטי אחיד המופעל על החוט.

עבודות קודמות

עבודה קודמת במעבדה²³, הראתה אפשרות להערכת הזרם הקריטי I_c של סליל תחת שדה עצמי, תוך שימוש במדידות I-E בחוט בודד תחת השפעת שדה מגנטי במאונך למישור החוט, תוך הנחה כי ניתן שימוש במדידות I-E בחוט בודד תחת השפעת שדה מגנטי במאוניך למישור החוט, תוך הנחה כי ניתן להזניח את השפעת השדה המגנטי המקביל לפני החוט. עבודה ראשונית זו, התמקדה בחיזוי הזרם הקריטי בלבד I_c שבו הסליל מגיע לשדה חשמלי $I\mu V/cm$ בממוצע, תחת הנחה נוספת והיא שכל מקטע בסליל נמצא בזרם קריטי ובעל שדה חשמלי זהה לממוצע ($I\mu V/cm$). תחת הנחת הנחת אלו ניתן לאמוד את הזרם הקריטי במצא בזרם קריטי ובעל שדה חשמלי זהה לממוצע ($I\mu V/cm$). תחת הנחות אלו ניתן לאמוד את הזרם הקריטי במצא בזרם קריטי ובעל שדה חשמלי השמלי זהה לממוצע ($I\mu V/cm$). תחת הנחות אלו ניתן לאמוד את הזרם הקריטי בקירוב טוב, אולם לא ניתן לדעת את התפלגות השדה החשמלי, התפלגות השדה המגנטי הקריטי בקירוב טוב, אולם לא ניתן לדעת את התפלגות השדה החשמלי, התפלגות השדה המגנטי הקריטי בקירוב טוב, אולם לא ניתן לדעת את התפלגות השדה החשמלי, התפלגות השדה המגנטי הקריטי בקירוב טוב, אולם לא ניתן לדעת את התפלגות השדה החשמלי, התפלגות השדה המגנטי הקריטי בקירוב טוב, אולם לא ניתן לדעת את התפלגות השדה החשמלי, התפלגות השדה המתפתח בסליל כאשר שנו והתפלגות הזרם ברוחב החוט לאורך הסליל. בנוסף, לא ניתן לחזות את המתח המתפתח בסליל כאשר ישנו זרם כלשהו בסליל שאיננו הזרם הקריטי. בעבודה המוצעת להלן, אנו מבצעים צעד נוסף השופך אור ישנו זרם לגותן תמונה רחבה יותר על המתרחש בסליל.

ב-2002 פיתח *Bi-2223*, המורכב מ-22 סלילי של סליל *Bi-2223*, המורכב מ-22 סלילי פנקייק המחוברים בטור, תחת ההנחה כי הזרם והשדה המגנטי מתפלגים הומוגנית לרוחב הסרט והשוני קנייק המחוברים בטור, תחת ההנחה כי הזרם והשדה המגנטי מתפלגים הומוגנית לרוחב הסרט והשוני קיים רק בין ליפוף לליפוף. הנחה זו תקפה אך ורק למקרה הפרטי של סליל ארוך במבנה סולנואיד, אך איים רק בין ליפוף מרסים. של התפלגות שדה אי-הומוגנית לרוחב הסרט- בעיה המהווה נושא מרכזי בעבודתנו.

ב- 2004 פיתח ²⁵J. Lehtonen מודל חישובי, המנסה לחזות את הזרם הקריטי, התפלגות השדה המגנטי והזרם החשמלי בחוט בודד ובחוט Bifilar (שני חוטים בחיבור טורי, המוצמדים בניהם כך שכיוון הזרם בין החוטים אנטי-מקבילי), תחת השפעת השדה המגנטי העצמי של החוט, במטרה להבין את השפעתו של השדה העצמי על הזרם הקריטי בחוט Bi-2223 בודד. עבודה זו מתמודדת עם הבעיה של התפלגות שדה לא הומוגנית לרוחב הסרט אולם הקונפיגורציה של חוט בודד פחות מסובכת מסליל, אשר כאמור נחקר בעבודה זו.

חשיבות העבודה:

HTS נכון להיום אין כלי המציע חיזוי של אפיין הסליל (I-E) לפני בנייתו. תחום זה של ליפוף חוטים לסלילים נמצא בשלביו הראשונים ונעשה בדרך של ניסוי וטעייה תוך ניסיון מתמיד למצוא שיטות שונות על מנת לחשב את ביצועי הסליל טרם בנייתו. בעלות הגבוהה של חוטי HTS, יכול כלי כזה לשפר את תכנון הסליל, להגדיל את נצילות החוט ולחסוך עלויות רבות.

מציאת הנקודות בסליל בהן הפסדי האנרגיה הגבוהים ביותר הינה חיונית על מנת לאפשר עבודה יציבה של סלילים מוליכי על. הכלי המוצג בעבודה זו מאפשר לזהות נקודות תורפה אלו, כך שבעזרת מידע זה תתאפשר בקרה מהימנה על פעילותו התקינה של הסליל.

כאמור לעיל, ככלל אין תיאוריה מקיפה ל-HTS ובפרט לעקומות I-E. לכן, מיפוי עקומות I-E של חוט באמור לעיל, ככלל אין תיאוריה מקיפה ל-Bi-2223 בודד- Bi-2223, תחת השפעת שדה מגנטי, מהווה בסיס נתונים למחקר והבנת תחום זה במעבדתנו.

פרק 2- תיאור המערכת הניסויית ותהליך המדידה

בפרק זה מוצגת המערכת הניסויית שנבנתה לשם מדידת עקומות *I-E* בסרט Bi-2223 תחת השפעת שדה מגנטי הומוגני בכיוונים שונים ביחס למישור הסרט. תרשים סכמאטי של תהליך המדידה מובא באיור 2.1 ופירוט תפקידו של כל חלק מתואר להלן.



איור 2.1: תרשים סכמאטי של תהליך המדידה.

לצורך ביצוע מדידות *I-E* בחוט עבור טמפרטורת שונות הנמוכות מטמפרטורת חנקן נוזלי, בנינו מערכת מורכבת המבוססת על קירור במעגל סגור. תצלום המערכת מופיע באיור 2.4 בסוף פרק זה. עם זאת, מורכבת המבוססת על קירור במעגל סגור. תצלום המערכת זו (החלק המפורט להלן) וטבלנו אותו בחנקן נוזלי לשם השגת תוצאות מדויקות ככל האפשר עבור טמפרטורה זו.

המגנט

לבניית המגנט השתמשנו ב- 8 סלילים Bi-2223 (Pancake) מחוברים בטור אשר לופפו בעזרת חברת "ריקור". כל סליל מורכב מ- 100 ליפופים כמתואר בפרק 1. הסליל מחולק לשתי קבוצות בנות ארבעה "ריקור". כל סליל מורכב מ- 100 ליפופים כמתואר בפרק 1. הסליל מחולק לשתי קבוצות בנות ארבעה סלילים המרחק של 20 מ"מ בכדי להגדיל את הומוגניות השדה, כאשר בתווך מונח הדגם הנמדד. כל ארבעה סלילים מחוברים בהלחמה של הקוטר הפנימי והחיצוני לסירוגין על מנת ליצור הדגם הנמדד. כל ארבעה סלילים מחוברים בהלחמה של הקוטר הפנימי והחיצוני לסירוגין על מנת ליצור הדגם הנמדד. כל ארבעה סלילים מחוברים בהלחמה של הקוטר הפנימי והחיצוני לסירוגין על מנת ליצור הדגם הנמדד. כל ארבעה סלילים מחוברים בהלחמה של הקוטר הפנימי וחחיצוני לסירוגין על מנת ליצור זרכן מועברים מוטות נחושת. קוטרו הפנימי והחיצוני של הסליל הנו 70 מ"מ ו- 140 מ"מ, בהתאמה. מועברים מוטות נחושת. קוטרו הפנימי והחיצוני של הסליל הנו 70 מ"מ ו- 140 מ"מ, בהתאמה. מועברים מוטות נחושת קוטרו הפנימי והחיצוני של הסליל הנו 70 מ"מ ו- 140 מ"מ ו כ- 20.00 לאורך 20 מ"מ ו מות גבוה כ- 77 מומגניות השדה במרכז הסליל הנו 78 G/A. הזרם המקסימאלי שניתן להזרים במגנט ב- 77 מומ. הזרם גנו 45 הגו 45 הגום גנו 45 הגנו 50 מ"מ ו כ- 45.00 לאורך 50 מ"מ. היחס בין עוצמת השדה לזרם בסליל הנו 78 G/A. הזרם המקסימאלי שניתן להזרים במגנט ב- 45 הגו א הגו 45 הגו 45 הגום גנו 45 הגום אורך 50 מ"מ ו מומגניות השדה המקסימאלי שנוצר במרכזו בזרם זה הנו כ- 45.01.



. אמפר. איור 2.2: תוצאות מדידת התפלגות השדה המגנטי הנוצר מהמגנט על פני אזור המדידה בזרם 1 אמפר.

הדגם ומחזיק הדגם

באיור מספר 2.3 ניתן לראות את מחזיק הדגם והדגם עליו בוצעו המדידות בהשפעת שדה מגנטי. תפקידו של בסיס הדגם הנו להעביר זרם לדגם, להוות תמיכה פיזית לדגם ולאפשר סיבוב הדגם סביב ציר הזרם של בסיס הדגם הנו להעביר זרם לדגם, להוות תמיכה פיזית לדגם ולאפשר סיבוב הדגם סביב ציר הזרם כך שהזרם תמיד מאונך לשדה המגנטי. לצורך זה, בסיס הדגם מתוכנן כך שקצותיו מבודדות חשמלית ממרכזו ע"י גלילי סיליקון עם תעלות, שדרכן "מושחל" הדגם. הדגם מולחם לקצות הבסיס העשוי נחושת ממרכזו ע"י גלילי סיליקון עם תעלות, שדרכן "מושחל" הדגם. הדגם מודבק באמצעות סרט קפטון לבסיס הדגם כך שקצוות אלו מעבירות את הזרם מהספק לדגם. מרכז הדגם מודבק באמצעות סרט קפטון לבסיס הדגם על מנת ליצור בידוד חשמלי ולספק תמיכה פיזית שתגבר על הכוחות הפועלים על הדגם בהיותו נושא זרם בשדה מגנטי. גלילי הסיליקון וסרט הקפטון יוצרים מצב בו כל הזרם מועבר רק דרך הדגם באזור המדידה. בקצהו האחד של הבסיס גלגל משונן המאפשר סיבוב הדגם בתחום 0-90 במדרגות של 50.



איור 2.3: תצלום של הדגם, בסיסו, ומעגל המדידה (למטה), ומבנה המאפשר סיבוב מבוקר של בסיס הדגם ומיקומו במרכז המגנט (למעלה).

לשם מדידת המתח המתפתח במוליך העל חיברנו דגם באורך של 140 מ"מ מולחם על בסיס הדגם העשוי נחושת. מדידות המתח התקבלו משני ערוצי מתח לאורך 20 ו- 30 המ"מ המרכזיים בהם הומוגניות השדה גבוהה (0.2% ו- 0.5% בהתאמה), כמוראה באיור 2.2. החוטים המשמשים לקריאת המתח הנם זוגות של חוטי נחושת מסוככים השזורים אחד סביב השני לשם הפחתת רעשים. הלחמת החוטים לדגם בוצעה בעזרת סגסוגת בדיל בעלת טמפרטורת היתוך נמוכה (100⁰C). בטמפרטורה כזו החוטים מולחמים לציפוי הנירוסטה ואין פגיעה בתכונות ההולכה של החומר.

ציוד היקפי ועזרים

TUSHIBA THS118 Hall-Probe

ה- Hall-probe ממוקם במרכז המגנט ותפקידו למדוד את עוצמת השדה המגנטי במהלך המדידות. כיול ה- Hall-probe בוצע באמבט חנקן נוזלי.

Agilent 6681A :DC ספק זרם

בספק זה אנו משתמשים על מנת לספק זרם לדגם מוליך העל. ערכי המקסימום של מתח וזרם בספק זה הינם 8 וולט ו- 580 אמפר בהתאמה. כמו כן הספק ניתן לתכנות של קפיצות זרם בפרקי זמן קבועים תוך הגבלת המתח או הזרם למניעת זרם עודף (quench).

נפק זרם Kepco BOP. 20-50MG :DC ספק זרם

בספק זה השתמשנו על מנת לספק זרם למגנט. מספק זה ניתן להפיק זרמים של עד 50 אמפר ומתחים של עד 20 אמפר ומתחים של עד 20 וולט. ספק ניתן לתכנות ולהגבלת מתח או זרם.

KEITHLEY 2001 מולטימטר דיגיטאלי רב ערוצי מסוג

במכשיר זה השתמשנו לקריאות אותות המתח המתפתח במוליך העל, המתח על ה-shunt של ספק הזרם וכן קריאות המתח על ה-GPIB. המכשיר נשלט ע"י מחשב דרך חיבור GPIB. המחשב מפעיל את המולטימטר כך שמתקבלת קריאה מכל הערוצים בו זמנית (10 ערוצים בפחות משניה) והנתונים נקראים לקובץ. מערך המדידה הורכב לצורכי העבודה ותוכנת הבקרה ואיסוף הנתונים נכתבה לצורך זה תוך שימוש בתוכנת "LabView".

השיטה ותהליך המדידה

כאמור, מטרתנו לבנות מודל חישובי, המאפשר לחזות את עקומת I-E של סלילים, המלופפים מחוטים מאוליכי-על Bi-2223, ע"י חקירת עקומת I-E של סרט בודד והשתנותה כתוצאה משדה מגנטי הומוגני המוליכי-על החוט. חלק זה, מתמקד בחקירה ניסיונית של אפייני I-E בסרט בודד Bi-2223, כתלות במופעל על החוט. חלק זה, מתמקד המקד בחקירה ניסיונית של אפייני אפייני Four-Points, כמפרטורה זו, בוצע הניסוי באמבט חנקן נוזל. כל מדידות המתח-זרם בוצעו בשיטת ליסוים.

מדידת הזרם הקריטי במוליך העל מתבצעת ע"י העברת זרם (*I*) במוליך העל ומדידת המתח (*V*) לאורך מקטע מסוים של הדגם. אפיין *I-E* מתקבל כאשר מבצעים מספר מדידות מתח תוך העלאת הזרם בדגם ע"י ספק הזרם באופן הבא: אנו מקבעים את הדגם בזווית הרצויה ביחס לשדה המגנטי וקובעים את עוצמת ע"י ספק הזרם באופן הבא: אנו מקבעים את הדגם בזווית הרצויה ביחס לשדה המגנטי וקובעים את עוצמת ע"י ספק הזרם באופן הבא: אנו מקבעים את הדגם בזווית הרצויה ביחס לשדה המגנטי וקובעים את עוצמת ע"י ספק הזרם באופן הבא: אנו מקבעים את הדגם בזווית הרצויה היחס לשדה המגנטי וקובעים את עוצמת ע"י ספק הזרם באופן הבא: אנו מקבעים את הדגם בזווית הרצויה ביחס לשדה המגנטי וקובעים את עוצמת ע"י ספק הזרם באופן הבא: הע"י ספק הזרם באופן הבא: השדה המגנטי. קריאות ערוצי המתח השונים מבוצעות ע"י המולטימטר. הזרם המסופק נמדד באופן מדויק ע"י העדה השדה המגנטי. קריאות ערוצי המתח השונים מבוצעות ע"י המולטימטר. הזרם המסופק נמדד באופן מדויק ע"י העדה השדה המגנטי. קריאות ערוצי המתח השונים מבוצעות ע"י המולטימטר. הזרם המסופק נמדד באופן מדויק ע"י העברתו בנגד בעל התנגדות ידועה (Shunt resistor) של *0.4 m*Q אורך המדידות נע בתחום *0-150* ההשמלי המתפתח עליו. *ווע ערעי* שליו גע בתחום *10 μV/cm*

זוויות המדידה שנבחרו הינן 0.90^{0} בקפיצות של 10° כשזווית 0° משמעותה שדה מגנטי מאונך לצד 0- חוויות המדידה שנבחרו הינן 90° בקפיצות של 1-V בתחום 1-V בתחום הסרט וזווית של הסרט וזווית 0.3510 שדה מגנטי מקביל. לכל זווית של שדה מגנטי ביצענו מדידות 156 בתחום 3510 G בוצעה מדידה כל 3510 G ובתחום 3510 G.

דיוק המדידות

*I*_c ישנם מקורות רבים היכולים לגרום להפרעות בקריאת המתח במהלך מדידת *I*-V. על מנת שמדידות ישנם מקורות רבים היכולים לגרום להפרעות בקריאת המתח בסדר גודל של מדידת המתח הקריטי. המדידה כאמור מהיינה מהימנות, אסור שסכום הפרעות המתח יהיה בסדר גודל של מדידת המתח הקריטי. המדידה כאמור מבוצעת לאורך 20 ו 30 מ"מ, ולכן ע"פ הקריטריון המקובל לזרם הקריטי (1μV/cm), המתח הקריטי הוא 2 ו 3 מיקרו-וולט בהתאמה. לאחר הפחתת הפרעות המדידה המתוארות להלן, הגענו לדיוק מדידה של כ-0.1μV בקריאת המתח.

רעש אקראי

רעש אקראי מהסביבה נובע בד"כ מלולאות שאוספות רעש אלקטרומגנטי (Pick- up loops). הלולאות הינן השטח בין חוטי קריאת המתח והעל מוליך או בין החוטים עצמם המתנהגים כאנטנה ואוספים רעש dΦ/dt אלקטרומגנטי מהסביבה. לכן, החוטים מסוככים ושזורים על מנת להקטין שטח זה (מבטל לולאת של סיגנלים הנכנסים מהסביבה) וכמו כן החוטים מוצמדים למוליך העל באזור המגע ^{26,1}.

כמו כן, גורם נוסף לרעש אקראי הינן תזוזות קלות בין המוליך לשדה המגנטי בו הוא נמצא וגורמות למתח מושרה¹. ע"י קיבוע המוליך ביחס לשדה אנו מבטלים מקור רעש זה.

בנוסף, כל קריאת מתח במולטימטר התקבלה מתוך מיצוע של 20 קריאות מתח רגעיות על מנת להפחית עד כמה שניתן רעשים אקראיים.

תוספת מתח תרמו-אלקטרי

תוספת מתח הנובעת מאפקט תרמו-אלקטרי במדידות *I-V* במוליכי על נוצרת בעיקר אם כניסות הזרם קרובות למגעי המתח. בעת הזרמת זרמים גבוהים אזור המגע של כניסת הזרם למוליך העל מתחמם ולכן על מנת להימנע מבעיה זו יש לחבר את מגעי המתח רחוק מכניסת הזרם כך שהטמפרטורה של מגעי המתח לא תושפע. בניסוי זה אנו משתמשים בין היתר לצורך כך בדגם ארוך כך שמגעי המתח במרכז הדגם רחוקים מאוד מכניסות הזרם בקצוות וכך אנו מבטלים בעיה זו. בנוסף, הדגם כולו עם מגעי המתח טבולים באמבט חנקן נוזל ונמצאים בטמפרטורה קבועה.

מערכת מדידה במעגל סגור

המערכת שתוארה לעיל, בה בוצעו מדידות בחנקן נוזלי, הינה כאמור חלק ממערכת גדולה יותר מבוססת קירור במעגל סגור בוואקום, שבנינו לצורך עבודה בטמפרטורות נמוכות מ- 77 K. תצלום המערכת מובא באיור 2.4 ותיאור חלקיו להלן:





a .77K - איור 2.4: תצלום של מערכת מדידה בקירור יבש שנבנתה לצורך עבודה בטמפרטורות נמוכות מ- a .77K. מבט b איור גמוכות מ

- .30K מקרר בעל הספק קירור 30 וואט ב-77K ו-6 וואט ב- 1.
 - .2 כניסות זרם גבוה לדגם עשויות נחושת.
- .3 בסיס הקראוקולר אליו מחובר קריאוסטט נירוסטה מגן קרינה. גרדיאנט הטמפרטורה לדרגה ראשונה: 300K→77K.
- 4. "אצבע קרה" –גוף הקירור הסופג את החום במערכת. מחובר לפלטות נחושת (5,12) הבאות במגע רחב עם חלקי המערכת (סליל,דגם,כניסות הזרם וכו').
 - .5 פלטת נחושת המחוברת לאצבע קרה לקירור דרגה ראשונה (T~77K).
 - .6 כניסות הזרם לסליל.
 - .7 כניסות זרם עשויות פליז (הולכת חום ירודה ביחס לנחושת).
 - .8 4 מובילי הזרם- כל מוליך מורכב מ-6 חוטי Bi-2223 מחוברים במקביל.
- 9. דרגת קירור שנייה של האצבע הקרה. באה במגע תרמי עם הדגם דרך בסיסו ועם הסליל דרך פלטות הנחושת.
 - .10 מוטות נחושת דרכם עובר החום מפלטות הנחושת לאצבע הקרה.
 - .(9). בסיס הדגם-מחובר לדרגה שנייה של האצבע הקרה

- .12 פלטות הנחושת הסופגות חום מהסליל.
 - .13 כניסות הזרם לסליל.
- .14 מגן קרינה עשוי נחושת, מחופה בשכבות Super-Insulator. גרדיאנט טמפרטורה 77K→30K.
 - .15 כבל נתונים –54 ערוצי מדידה אפשריים.

פרק 3 : המודל החישובי

תיאור הסליל

כפי שהוזכר לעיל, בעיית התפלגות השדה והזרם הינה בעיה סבוכה. מחד השדה המגנטי בכל אזור תלוי בהתפלגות הזרם סביבו, ומאידך התפלגות הזרם במוליך על HTS תלויה בהתפלגות השדה המגנטי. מכיוון שזוהי בעיה רקורסיבית, הגישה הנומרית טבעית לפתרונה.

בפרק זה אנו מציגים את האלגוריתם שנבנה על מנת לפתור בעיה זו. האלגוריתם כאמור מתבסס על תוצאות המדידות בחוט בודד והגיאומטריה של הסליל: קוטר פנימי, קוטר חיצוני ומספר הליפופים.

. באיור 3.1 מובא תיאור סכמתי של הסליל



 N_l הסליל מורכב מ- חידה יחידה יחידה ושל לולאה משמאל, של סליל מורכב מ-3.1איור סכמתי של סליל איור משמאל, איור 3.1 איור 3.1 איור לילאה מחולקת במודל ל- N_e לולאה לולאה לולאה לולאה מחולקת במודל ל

בניתוח התנהגות הסליל נעשו מספר הנחות המתאימות את הסליל הפיזי לסליל הדיסקרטי בסימולציה. הסליל הפיזי מלופף מחוט בודד המלופף סביב עצמו N פעמים, ובכל לולאה הרדיוס משתנה כפי שניתן הסליל הפיזי מלופף מחוט בודד המלופף סביב עצמו N פעמים, ובכל לולאה הרדיוס משתנה כפי שניתן לראות בתמונה בפרק 1. לעומת זאת, בסימולציה הסליל מכיל N_l לולאות, כך שלכל לולאה I מותאם לראות בתמונה בפרק 1. לעומת זאת, בסימולציה הסליל מכיל מכיל N_l לולאות, כך שלכל לולאה I מותאם רדיוס קבוע r_l , שהינו הרדיוס הממוצע ללולאה זו . בנוסף אנו מחלקים כל לולאה ל- N_e תת-לולאות (*Elements*) ברוחב W/N_e , כאשר W הנו רוחב החוט. מספר תת הלולאות בסליל הנו לכן ת-לולאה. תת-לולאה כזו, מיוצגת ע"י לולאת זרם ברוחב אינפיניטסימאלי הממוקמת במרכז תת-לולאה.

תרשים זרימת המודל

איור 3.2 ממחיש את תרשים הזרימה של המודל. במודל זה, אנו בוחנים את מצב המערכת לאחר שהגיעה לשיור ממקל (Steady-state).



איור 3.2: תרשים זרימה של המודל.

פירוט השלבים הנו כדלהלן:

שלב 1. אנו מתחילים בקביעת הזרם הזורם בסליל I_T אנו רוצים שהזרם יהיה קרוב לזרם הקריטי ולכן קביעת הזרם מובנית בתהליך החישוב ונעשית בהערכה גסה לזרם הקריטי בהתבסס על מספר הליפופים הכולל בסליל בלבד על פי ניסיון העבר.

אנית בסליל, כלומר: שלב 2. כעת אנו מניחים בשלב ראשון, באופן שרירותי, התפלגות זרם הומוגנית בסליל, כלומר: $I_{l,e} = I / N_e$ כאשר $I_{l,e} = I / N_e$ ובאלמנט $I_{l,e} = I / N_e$ הזרם בתת הלולאה הממוקמת בליפוף $I_{l,e} = I / N_e$ הנו מספר תת הלולאות לרוחב הסרט.

:-סבר: אנו מחשבים את וקטור השדה המגנטי $B_{l,e}$ לכל lו- g, תוך שימוש בחוק ביו-סבר: שלב $B_{l,e}$

$$B = \frac{1}{c} \int \frac{J(B,r') \times (r-r')}{|r-r'|^3} d^3r$$
 3.1 מש' 3.1

 $m{ heta}_{l,e} \mid |B_{l,e}|$ וכיוונו, השדה המגנטי את עצמת השדה המגנטי אנט זרם בסליל. בסופו של שלב זה אנו מחלצים את עצמת השדה המגנטי בסליל.

:I_{le} אישוב התפלגות הזרם **שלב 4.**

בפרק 4 להלן, מובאות תוצאות מדידות אפיין *I-E* על פני חוט בודד מהם קיבלנו את הפרמטרים (*B*, *θ*)

. $E = E_c \left(\frac{I}{I_c}\right)^n$ בתחום המעריכית $0^\circ \le \theta \le 90^\circ$ ו- $0 \le B \le 0.35T$ בתחום $n(B, \theta)$ ו-

-כעת, מתוך הנתונים האמפיריים שנתקבלו במדידות ומתוך חישוב עצמת השדה המגנטי וכיוונו בכל תת-לולאה, ניתן לקבל את $I_c(B_{l,e}, heta_{l,e})$ ו- $I_c(B_{l,e}, heta_{l,e})$ לכל תחום המדידה, ולהתאים לכל תח לולאה את הפרמטרים $I_{c_{l,e}}$ ו- גערים און את הפרמטרים את הפרמטרים און און את הוון את הוון את הוון את הוון און את הוון און אינון אינון

:מחושב מתוך המשוואה $I_{c_{Le}}$

$$I_{c_{l,e}} = rac{I_c(\left|B_{l,e}\right|, \theta_{l,e})}{N_e}$$
 3.2 'ww

:ו- נתון במשוואה $n_{l,e}$ ו-

$$\boldsymbol{n}_{l,e} = \boldsymbol{n}(\left|\boldsymbol{B}_{l,e}\right|, \theta_{l,e})$$
 3.3 'aw

, $\theta_{l,e}$ ו- $B_{l,e} \mid B_{l,e} \mid B_{l,e}$ אנו מחשבים את הפרמטרים המתאימים לכל תת-לולאה עבור כל א הפרמטרים אנו מחשבים אנו מחשבים את המובאות בפרק 1. שימוש באינטרפולציה ליניארית פשוטה²⁷ של תוצאות המדידות המובאות בפרק 4.

$$E_{l} = \left(\frac{I_{l,l}}{I_{c_{l,l}}}\right)^{n_{l,l}} = \left(\frac{I_{l,2}}{I_{c_{l,2}}}\right)^{n_{l,2}} = \left(\frac{I_{l,3}}{I_{c_{l,3}}}\right)^{n_{l,3}} \dots = \left(\frac{I_{l,N_e}}{I_{c_{l,N_e}}}\right)^{n_{l,N_e}} 3.4 \text{ ww}$$

והמשוואה ה- N_e מתקבלת כשמתחשבים בעובדה, שסך הזרם בכל לולאה שווה לזרם הכללי המוזן בסליל:

באופן זה מתקבל סט של N_e משוואות לא ליניאריות ב- N_e נעלמים. פתרון המשוואות מתקבל תוך באופן זה מתקבל סט של N_e משוואות לא ליניאריות. פתרון שימוש בפונקציה fsolve, שימוש בפונקציה ערכת המשוואות נותן את התפלגות הזרם בלולאה l לאיטרציה זו.

איור 3.3 ממחיש באופן גרפי את חישוב התפלגות הזרם בליפוף I. לכל תת לולאה בליפוף מתאימה עקומת I-E ממחיש באופן גרפי את חישוב המגנטי וכיוונו. התנאי שהשדה החשמלי זהה לכל תת הלולאות, עקומת I-E בהתאם לעצמת השדה המגנטי וכיוונו. התנאי שהשדה החשמלי זהה לכל תת הלולאות, בצירוף התנאים כי סכום הזרמים קבוע וכל העקומות הינן פונקציות רציפות ועולות, מגדיר פתרון יחיד להתפלגות הזרם הזרמים קבוע וכל העקומות הינן פונקציות רציפות ועולות, מגדיר פתרון יחיד שאם נניח קריים פתרוף התנאים כי סכום הזרמים קבוע וכל העקומות הינן פונקציות רציפות ועולות, מגדיר פתרון יחיד להתפלגות הזרם הזרמים קבוע וכל הסבר כי לא קיים פתרון נוסף נובע מתנאים אלה כיוון שאם נניח שקיים פתרון אחר ל- E_1 , אזי אם הוא גדול מ- E_1 שמצאנו נובע שסך הזרמים גדול מהזרם הכללי (כל הפונקציות עולות), ואם הוא קטן מ- E_1 נובע שסך הזרמים קטן מהזרם הכללי. כלומר התנאי שסך הזרמים קבוע, מאלץ את המערכת לפתרון יחיד.



תחת התנאים כי I-E תהליך חישוב התפלגות הזרם בליפוף *l*. לכל תת לולאה מתאימה עקומת I-E. תחת התנאים כי היור 3.3 השדה החשמלי זהה בכל תת הלולאות וסכום הזרמים קבוע, מתקבל פתרון יחיד.

שלב 5. בשלב זה אנו מחשבים את השדה החשמלי הממוצע המתפתח בסליל כאשר המתח על פני כל הסליל הנו:

$$V_T = \sum_{l=1}^{N_I} 2\pi r_l E_l$$
 3.6 מש'

והשדה החשמלי הממוצע הנו המתח מחולק באורך הסליל:

$$\overline{E} = rac{V_T}{\displaystyle{\sum_{l=1}^{N_l} 2\pi r_l}}$$
מש' 3.7

שלב 6. בשלב זה אנו משווים את השדה החשמלי הממוצע החדש עם זה שהתקבל באיטרציה הקודמת. שלב 6. בשלב זה אנו משווים את השדה החשמלי מסוים אנו מקבלים נקודה אחת לבניית גרף \overline{E} . כאשר השגיאה גדולה כאשר השגיאה המקסימאלי כ- 0.1%.

שלב 7. אנו חוזרים על תהליך חישוב \overline{E} עבור זרמי כניסה I_T שונים. כאשר יש לנו מספר נקודות \overline{E}

.
$$(\overline{E}=E_{c}\left(rac{I}{I_{c}}
ight)^{n}$$
 אנו בונים באמצעותן גרף $I-\overline{E}$ (בהתאמה לפונקציה) מספק, אנו בונים באמצעותן גרף

להחלת האלגוריתם על סליל המורכב ממספר סלילי פנקייק המחוברים ביניהם בטור, אנו מבצעים שינויים באלגוריתם. במקרה זה הזרם הכללי מתפלג בכל פנקייק בנפרד ולכן התנאים הפיסיקליים עבור שינויים באלגוריתם. במקרה זה הזרם הכללי מתפלג בכל פנקייק בנפרד ולכן התנאים הפיסיקליים עבור כל פנקייק נשארים זהים (כלומר שלבים 2 ו 4 תקפים ללא שינוי). אולם חישוב $B_{l,e}$ מחושב מתרומת כל הפנקייקים לכל תת אלמנט (שלב 3), וחישוב השדה החשמלי הממוצע בסליל (שלב 5) הנו במקרה זה מחושב מתוחם מחושב מתויקים.

פרק 4: תוצאות ודיון

תוצאות המדידות הניסיוניות

,J הדרך המקובלת להציג תוצאות מדידה של הולכה חשמלית הינה תאור של E, השדה החשמלי, כנגד J, הדרך המקובלת להציג תוצאות מדידות I-V, ממדידות J.V ממדידות הזרם המקומית (J) ממדידות גפיפות הזרם המקומית (I-V) ממדידות הצגה זו התוצאות מוצגות בצורה האינטגראלית (בזרם) למתח המתפתח לאורך 1 ס"מ, דהיינו I-E. צורת הצגה זו נוחה כיוון שהינה בסיס נוח להשוואה בין עקומות חוטים וסלילים באורכים שונים.

I_c(B, θ) אפייני *I-E* הקריטי בשדה החיצוני *I-E* אפייני

איורים 4.1 ו- 4.2 מציגים אפייני *I-E* של סרט Bi-2223 ב-77K תחת מגוון ערכי שדה מגנטי חיצוני מאורים 1.1 ו- 4.2 מאונך ומקביל למישור b של הסרט בהתאמה.



0-3510 G בתחום ab איור 4.1: עקומות שדה מגנטי מאונך למישור Bi-2223 תחת השפעת שדה מגנטי מאונך למישור בתחום 1.5 איור 7.1: עקומות הנן הערכים הניסיוניים והקווים העוברים ביניהן הינם ההתאמה למשוואה 1.5.

הנתונים המוצגים הינם הממוצע של שני ערוצי מתח ומיצגים את המתח לאורך סנטימטר אחד של הסרט. הנתונים המוצגים הינם הינם המוצע של שני ערוצי I_c הנו הזרם (משוואה 1.5), $E = E_c \left(I/I_c \right)^n$ הנו הזרם כל העקומות מתוארות היטב ע"י כלל החזקה $E_c = 1 \mu V/cm$ (משוואה 1.5). הקריטי המתאים לקריטריון היט $E_c = 1 \mu V/cm$

מהגרף המוצג באיור 4.1 אנו רואים שעם עלית השדה המגנטי במאונך למישור הסרט, אפיין הסרט זז באופן מגמתי שמאלה כלומר הזרם הקריטי קטן, וככל שהשדה גדול יותר, החומר העל-מוליך מציג התנגדות חשמלית כבר בזרמים נמוכים.

הגרף המוצג באיור 4.2 מתאר אפייני *I-E* עבור שדה מקביל למישור הסרט ומראה מגמה דומה לגרף באיור 4.1 המוצג באיור 4.1 מאור הזרם הקריטי עם עלית השדה חלשה בהרבה מזו בשדה מאונר.



0- בתחום ab עקומות 4.2 עקומות Bi-2223 תחת השפעת שדה מגנטי מקביל למישור b בתחום -4.2 איור 4.2 עקומות 5.2 ב-1.2 של סרט 5.2223 הנקודות הינן הערכים הניסיוניים והקווים העוברים ביניהן הינם ההתאמה 3510G ב-77K. הנקודות הינן למשוואה 1.5



 0^{0} -90 ⁰ הזרם הקריטי עבור הזוויות, כפונקציה של עוצמת השדה המגנטי עבור הזוויות Bi-2223 איור 1.3 הזרם הקריטי עם איור 4.3 הזרם הקריטי עם הערשימים 1.4 ו-4.2 בשדה מאוגך ישנה דעיכה חדה בזרם הקריטי עם -77K. ערכי $I_{c}(B)$ חולצו מהעקומות בתרשימים 4.1 ו-4.2 בשדה מקביל. א.גרף דו מימדי; ב. גרף תלת מימדי.

איור מספר 4.3 מתאר את תלות ערכי הזרם הקריטי I_c , בשדה החיצוני כפי שנתקבלו מהתאמת העקומות בתרשימים 4.1 ו- 4.2 לכלל החזקה (משוואה 1.5). כמצופה, בשדה מאונך I_c דועך בצורה חדה עם עליית השדה, למעט בתחום G ס-000 בו ניתן להבחין בתלות חלשה בשדה. תלות חלשה זו מוסברת בעובדה שהשדה העצמי של הסרט והשדה החיצוני, הינם באותו סדר גודל וישנה בסה"כ תזוזה של בעובדה שהשדה המגנטי העצמי לרוחב הסרט, כתוצאה מהשדה חיצוני⁸². באיור 4.3 א' מובאות עקומות פרופיל השדה המגנטי העצמי בין שדה מחיצוני, הינם באותו סדר גודל וישנה בסה. 20 המכות של הסרט והשדה החיצוני, הינם באותו הלשה בשדה. תלות הלשה דה המגנטי העמית של הסרט השדה החיצוני, הינם באותו הדר גודל וישנה בסה. כתווזה של בעובדה שהשדה המגנטי העצמי של הסרט השדה החיצוני, הינם באותו הדר גודל השדה המגנטי המסרט המסרט החיצוני, הינם באותו הדר הידה המגנטי המסרט המסרט החיצוני, הינם באותו הדר הידה המגנטי המסרט המסרט החיצוני, הינם באותו הדר הידה המגנטי המסרט המסרט החיצוני, הינם באותו הינם באות עקומות פרופיל השדה המגנטי העצמי לרוחב הסרט, כתוצאה מהשדה חיצוני⁸. באיור 4.3 א' מובאות עקומות הרופיל השדה המגנטי העומות הביניים בין שדה מאונך למקביל. אנו רואים שככל שהשדה נוטה לכיוון המקביל הירידה בזרם הקריטי מתונה יותר. תרשים 4.3 ב' מתאר משטח תלת- ממדי של $I_c(B, \theta)$

תרשימים 4.1 - 4.3 ממחישים באופן מובהק את האניזוטרופיה של חוטי Bi-2223. אנו רואים כי שדה 50% מגנטי מאונך למישור החוט (⁰⁰) משפיע מאוד על הזרם הקריטי (כבר ב -780 G ישנה ירידה של 3500 (כבר ב-380 ירידה של כ-35%) ולעומת זאת, שדה מקבילי מקטין את הזרם הקריטי באופן מתון יותר (ב-3 G ירידה של כ-35%).

מעריך החזקה n הנו פרמטר חשוב המתאר את חדות המעבר למצב נורמאלי באופיין I-E, ומאפיין את איכותו של החזמר העל מוליך. איור 4.4, מתאר את ערכו של n כפונקציה של עוצמת השדה המגנטי n איכותו של החומר העל מוליך. איור 4.4, מתאר את ערכו של n כפונקציה של עוצמת השדה המגנטי n ו- I_c מדיר השונות בתחום 4.3 ו- 4.4 ו- 4.3 מציגים גרשימים 3.4 ו- מציגים תלות חזקה מציגים תלות חזקה מציגים תלות דומה בשדה המגנטי. שניהם יורדים באופן מונוטוני עם עליית השדה ומציגים תלות חזקה בשדה מאונך הקטנה ככל שהשדה מסתובב לכיוון המקביל.



. 77K- בסרט Bi-2223, כפונקציה של עוצמת השדה המגנטי עבור הזוויות Bi-2223, כפונקציה איור 4.4 איור

ab הנו הגורם ab מחקרים בגביש יחיד מראים כי בטמפרטורה קבועה רכיב השדה המגנטי המאונך למישור ab הנו הגורם לירידה בזרם הקריטי ובמעריך n, לעומת שדה מגנטי מקביל למישור ab שאינו משפיע כלל על גדלים אלירידה בזרם הקריטי ובמעריך bi-2223 איננו מושלם והגבישים אינם מסודרים כך שציר c מוגדר היטב אולם, המבנה של סרט Bi-2223 איננו מושלם והגבישים אינם מסודרים כך שציר bi-2223 איננו אילא בהתפלגות מסוימת סביב הווקטור המאונך לצד הרחב של הסרט³⁰.

Bi- שות מודל ע"י Van der Meer ושות'³¹, המתאר את התלות של הזרם הקריטי בסרט -Bi לאחרונה פותח מודל ע"י עם לכם עדרת מודל זה ניתן לחשב את השונות σ, של , 2223 בזווית השדה המגנטי בתחום 0-200mT בעזרת מודל זה ניתן לחשב את השונות המקביל התפלגות זווית הגבישים ביחס למישור הסרט, מתוך מדידות זרם קריטי, תחת שדה מגנטי מאונך ומקביל למישור הסרט בלבד. מתוך כך ניתן לחשב את הזרם הקריטי עבור כל זווית של שדה מגנטי.

מודל זה מבוסס על שתי הנחות עיקריות:

1 זווית סטיית מישורי הגבישים מתפלגת התפלגות גאוס, סביב מישור הסרט כאשר זווית
 .1
 .320° הסטייה הממוצעת

$$G(\varphi) = rac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\varphi^2/2\sigma^2)}, -90 \le \varphi \le 90$$
 4.1 משוואה 4.1

באיור 4.5 מובאים כיוון השדה ביחס למישור הסרט וכיוון זווית הסטייה של הגביש ביחס לסרט:



2. רכיב השדה המשפיע על הזרם הקריטי הנו הרכיב המאונך למישור הגביש בלבד. כלומר:

$$m{B}_{\perp,eff}\left(m{ heta}
ight) = \int\limits_{m{arphi}=-90^o}^{90^o} m{G}(m{arphi}) \Big| \cos(m{ heta}+m{arphi}) \Big| m{d}m{arphi}$$
 4.2 משוואה 4.2

. $(\sigma = \theta^o)$ כאשר עם מישור היו מיושרים אם כל הגבישים היו $B_{\perp,eff}(\theta) = B \left| \cos(\theta) \right|$ כאשר

ניתן השדה המאונך , 34,33 Shevchenko ניתן להגדיר פונקציה שהוצגה לראשונה ע"י המאונה $f(\theta)$ האנקטיבי פונקציה , $B_{\perp,eff}(0)$, 0° ניתן אפקטיבי בזווית , בשדה מאונך השדה האפקטיבי בזווית

$$f(\theta) = rac{B_{\perp,eff}(\theta)}{B_{\perp,eff}(0)} = rac{\int\limits_{arphi=-90^o}^{90^o} G(arphi) \left|\cos(heta + arphi)\right| darphi}{\int\limits_{arphi=-90^o}^{90^o} G(arphi) \left|\cosarphi\right| darphi}$$
 4.3 аминият 4.3 аминият

הפונקציה (θ) הינה פונקצית התאמה שאיננה תלויה בעוצמת השדה. איור 4.6 מראה את התנהגות הפונקציה הפונקציה ספר ערכי סטיית התקן σ של הזווית φ . לדוגמא, עבור $\sigma=\sigma$ הפונקציה זהה לפונקציה הפונקציה עבור מספר ערכי סטיית התקן σ של הזווית φ . לדוגמא, עבור $\sigma=0$ הפונקציה זהה לפונקציה הפונקציה מתארך .cos(θ). כאשר $\sigma > 0 - \theta = 0$ ו- $\sigma > 0 - \theta = 0$ מופיע מעין זנב לפונקציה. עם עליית σ ($\theta > 0^{\circ} - \sigma$ הוב מתארך .cos(θ). הפונקציה מתרחקת מהגרף של $\cos(\theta)$. הפונקציה מקבלת ערך כמעט קבוע כאשר $\sigma > 0^{\circ} - 87^{\circ}$. הפונקציה מקבלת ערך כמעט קבוע כאשר $\sigma = 0^{\circ} - 87^{\circ}$. אפקט זה בולט יותר כאשר ערך σ גדל. הקשר (עד כדי שגיאה של 10) בין - σ ל- σ הנו:

$${m \sigma}=70.9 f(90^o)$$
 4.4 משוואה

 $0^{o} < \sigma < 20^{o}$ כאשר

מתוך ההנחה כי הזרם הקריטי בסרט מושפע רק מהרכיב המאונך למישורי *ab* של הגבישים נובע ישירות כי:

4.5 משוואה
$$I_c(B, \theta) = I_c(B \cdot f(\theta), 0^o) \equiv I_c(B^*, 0^o)$$

כאשר ${}^{*}B$ הנו עוצמת השדה המותאם ע"י הפונקציה $f(\theta)$. לכן, עבור שדה מגנטי מקביל ושדה מגנטי מאונד למישור הסרט:

4.6 משוואה
$$I_c(B,90^o) = I_c(B \cdot f(90^o), 0^o)$$



הנקודות בגרף הינן . הפונקציה ($f(\theta)$ עבור מספר ערכי σ . בנוסף מובא הקשר בין דיס לבין לבין $f(\theta)$. הנקודות בגרף הינן נתונים איור 4.6 גתונים מחושבים והקו העובר ביניהן, הנו קירוב ליניארי של נתונים אלה.

מתוך מדידות זרם קריטי כפונקציה של שדה מגנטי מקביל ושדה מגנטי מאונך בלבד ניתן לחשב את ערך מתוך מדידות זרם קריטי σ - אמשוואה 4.3 ($f(90^\circ)$, באמצעותו לחלץ את σ - $f(90^\circ)$

,4.3 מתוך התוצאות לשדה מגנטי מאונך ($\theta = \theta'$) ולשדה מגנטי מקביל ($\theta = \theta'$) המובאות לעיל באיור 4.3 מתוך התוצאות לשדה את הערך של (σ - σ לכן, כפי סישבנו את הערך של ($f(90^{\circ})$ ממשוואה 4.3 והערך שהתקבל הנו 0.14. ערכה של - σ לכן, כפי שמחושבת מתוך משוואה 4.4 הינה σ : 10°.

באיור 4.7 כפונקציה של השדה המשוקלל באיור 4.3 כפונקציה של השדה המשוקלל באיור 4.7 מובאות התוצאות לזרם הקריטי שהוצגו באיור 4.3 כפונקציה של השדה המשוקלל . $\sigma = 10^{\circ}$ הפונקציה $f(\theta)$ מחושבת מתוך משוואה 4.3, כאשר סטיית התקן הינה $f(\theta)$ מהגרף ניתן לראות בבירור כי עבור הנתונים לזרם קריטי ישנה התאמה גבוהה בין המדידות (שגיאה מהגרף ניתן לראות בבירור זה מצליח להסביר היטב את התנהגות הזרם הקריטי כפונקציה של השדה המגנטי בסרט 10223.

איור 4.8, בדומה לאיור 4.7, מציג את הנתונים למעריך *n* עבור אותו הדגם, כפונקציה של **B*. גם כאן, ישנה התאמה למודל והשגיאה המקסימאלית הינה כ- 10%.

לסיכום, שיטה זו נותנת תיאור קומפקטי של השפעת עוצמת השדה וכיוונו ביחס לסרט, על הזרם הקריטי ומעריך החזקה בטמפרטורה קבועה. פרמטרים אלה הם המפתח למשוואה (חוק החזקה *I-E*), ולכן חישוב

I_c-B ישיר של עקומת *I-E* בסרט על מוליך החשוף לשדה הומוגני אפשרית, תוך שימוש בשתי עקומות בלבד.



 $.0^{\circ}-90^{\circ}$ איור התלות הזוויתית של B^{*} ב של B^{*} ב איור התלות הזוויתית של הזרם איור 4.7 עבור אוויתית של איור



במצב בו זורם בחוט הזרם הקריטי, כוח ה-Pinning הלוכד את הפלקסונים משתווה לכוח לורנץ ותנועת הפלקסונים שמשמעותה התפתחות מתח והפסדי אנרגיה, הופכת למשמעותית כמוסבר בפרק 1. לכן, כוח לורנץ בזרם קריטי מהווה מדד לעוצמת כוח ה- Pinning.



ב- Bi-2223 כוח ה- Pinning כפונקציה של השדה המגנטי B^{*}, בסרט Ei-2223 ב- 77K. הנקודות הינן הנתונים שהתקבלו במדידות והקו העובר בניהן הנו להמחשה בלבד.

התלות של עוצמת ה- *Pinning* כפונקציה של השדה B^* מובאת באיור 4.9. הנתונים המובאים כאן זהים לנתונים באיור 4.7 כאשר הנקודות הינן הנתונים הניסיוניים והקו העובר בניהן הנו להמחשה בלבד. הנתונים מראים כי עם עליית השדה גדל כוח ה- *Pinning* עד למקסימום ומנקודה זו דועך בהדרגה. ניתן הנתונים מראים כי עם עליית השדה גדל כוח ה- *Pinning* עד למקסימום ומנקודה זו דועך בהדרגה. ניתן להסביר זאת באופן איכותי: ככל שמגדילים את השדה המגנטי החיצוני יותר פלקסונים נוצרים ותופסים מספר גדל של מרכזי לכידה. לכן הכוח הדרוש לניתוקם ממרכזי הלכידה גדל. השדה המגנטי בנקודת מספר גדל של מרכזי לכידה. לכן הכוח הדרוש לניתוקם ממרכזי הלכידה גדל. השדה המגנטי בנקודת ותופסים ותופסים מספר גדל של מרכזי לכידה. לכן הכוח הדרוש לניתוקם ממרכזי הלכידה גדל. השדה המגנטי בנקודת זו המקסימום ממלא את כל מרכזי הלכידה בקווי שטף ולכן הכוח הדרוש לנתקם מקסימאלי. מנקודה זו ואילך הוספת שדה מגנטי גורמת להופעת פלקסונים חופשיים (בעלי עומק בור פוטנציאל ממוצע קטן ולכן הכוח הדרוש לנתק את הפלקסונים קטן.

התוצאות הניסיוניות שהתקבלו מלמדות כי התלות של עקומת *I-E* בעוצמת השדה המגנטי ובכיוונו ביחס *I-E* התוצאות הניסיוניות שהתקבלו מלמדות לסרט *Bi-2223* מורכבת. אולם, ניתן לקבל בקירוב טוב תלות זו עבור כל טמפרטורה ממדידות

המובאת Shevchenko בשדה מקביל ובשדה מאונך למישור הסרט בלבד, תוך הסתמכות על שיטתו של למישור המובאת לעיל. קירוב עקומות אלה לפונקציה המעריכית מאפשר לנו לקבל שני פרמטרים חשובים המייצגים תלות זו בצורה קומפקטית I_c (B, θ) ושל I_c (B, θ) שני פרמטרים אלו משמשים לנו בסיס נתונים לסימולציה שתוארה בפרק 3 ושתוצאותיה מובאות להלן.

תוצאות הסימולציה

תוצאות ומסקנות

תוצאות הסימולציה המובאות בפרק זה מתייחסות לסליל בתצורת פנקייק, המלופף מסרט בעל 55 סיבי מוליך על- Bi-2223 בתוך מטריצת כסף. המדידות הניסיוניות המובאות בחלקו הראשון של פרק זה, 140 נעשו כאמור, על סרט זהה. הסליל מורכב מ 100 ליפופים, בעל קוטר פנימי 70 mm, 70 קוטר חיצוני mm ואורך כללי m2~32 m. יצירת הסליל בוצעה ע"י חברת ריקור בתהליך אימפרגנציה בוואקום. תצלום של הסליל מופיע באיור 1.7.



איור 4.12: עקומת I-E של כפי שהתקבלה בסימולציה (קו עבה) בהשוואה למדידות שנעשו בסלילים בעלי גאומטריה זהה. מימין מוצגים ערכי Ic, n של ארבעה סלילים כנגד הערך שהתקבל בסימולציה (למעלה).

באיור 4.12 מתואר בפרק 3, בהשוואה באיור 4.12 מתוך המודל המתואר בפרק 3, בהשוואה לעקומות שנתקבלו בניסוי על מספר סלילים זהים, כאשר E הנו השדה החשמלי הממוצע על פני כל הסליל. כל נקודה בגרף התקבלה לאחר כ- 6 איטרציות כשהשינוי ב- E קטן מ- 0.001%. מתוך הגרף הסליל. כל נקודה בגרף התקבלה לאחר כ- 6 איטרציות כשהשינוי ב- I_c קטן מ- 1-9% מתוך הגרף הסליל. כי שנת לראות כי ישנה התאמה טובה מאוד של כ- 97% ו-97% בזרם הקריטי I_c ובערך החזקה n ביתן לראות כי ישנה הערקבל בסימולציה, לבין הערכים הנמדדים בניסוי. הערכים שהתקבלו במודל במודל במודל הערכים הממוצעים בניסוי הינם 13.6 איטרציות כי לראשונה מתוך הגרף המתקבל בסימולציה, לבין הערכים הנמדדים בניסוי. הערכים שהתקבלו במודל מודל מודל מודל מודל הערכים הממוצעים בניסוי הינם 13.6 איטרציות כי לראשונה מוצג מודל חישובי המתאר בדיוק רב, אפיין של סליל מוליך-על לפני בנייתו.

באיור 4.13 מובאת המחשה להתכנסות האלגוריתם לפיתרון, בהתאם לתנאי עצירת האלגוריתם: באיור 4.13 מובאת המחשה להתכנסות האלגוריתם לפיתרון, בהתאם לתנאי עצירת האלגוריתם: $(E_{new} - E_{old})/E_{old} < Error$ האיטרציה, והציר האנכי מסמל את אחוז השינוי בין שתי איטרציות עוקבות. מהגרף עולה בבירור כי האיטרציה מתכנס לפיתרון מהר מאוד. בעוד שהשינוי בין האיטרציה הראשונה לשנייה הנו ב- 70%, הוא דועך ל-4% באיטרציה השלישית ו-0.5% ברביעית.



איור 4.13: גרף המחשה להתכנסות האלגוריתם בתנאי העצירה $(E_{\it new}-E_{\it old})/E_{\it old} < Error$ איור מסמל את אינדקס האיטרציה והאנכי את אחוז השינוי. התכנסות האלגוריתם מהירה ולדוגמה השינוי בין האיטרציה מסמל את אינדקס. הרביעית לשלישית הנו כ-0.5%.

66 התרשימים הבאים מתארים את התפלגויות השדה המגנטי, השדה החשמלי והזרם בסליל עבור זרם אמפר שהינו סמוך לזרם קריטי. צורת הגרפים הינה הצורה המאפיינת של ההתפלגויות השונות עבור זרם כלשהו בתחום המדידות. בכל הגרפים המתארים את עוצמת השדה המגנטי אנו מתייחסים רק לערך המוחלט של עוצמת השדה, מכיוון שזהו הערך הקובע את התפלגות הזרם בסרט. באיור 4.14 מתוארת התפלגות השדה המגנטי הרדיאלי B_r כפי שהתקבל מתוך המודל, כשבסליל זרם של 66 אמפר כאמור לעיל. מובן כי התפלגות הזרם בחוט מושפעת מהערך המוחלט של השדה ולפיכך התוצאות המובאות כאן הנן ערכו המוחלט של השדה הרדיאלי. בכל ליפוף אנו מקבלים שדה רדיאלי אפס במרכז החוט וכשמתקרבים לשפת החוט השדה הרדיאלי מקסימאלי. בנוסף, אנו רואים שהשדה הרדיאלי מתעצם ככל שמתקרבים ללולאות האמצעיות.



איור 4.14: התפלגות השדה המאונך למישור הסרט: א. מבט תלת מימדי; ב. מבט על; ג. מבט צד; בכל הגרפים ניתן להבחין כי רכיב זה של השדה מקסימאלי בשפת הסרט ודועך לאפס במרכזו לאורך כל הליפופים. בנוסף ניתן להבחין בליפופים הקיצוניים ערכו נמוך ביחס לשאר הליפופים.

באיור 4.15 לעומת זאת, השדה המקביל B_z גדל ככל שמתקרבים למרכז החוט ומקבל ערך מינימאלי באיור 75. לעומת זאת, השדה המקביל בלולאה החיצונית הנו כ-56% מערכו בלולאה הפנימית, כלומר חוסר סימטריה בשדה המקביל, כמצופה.



איור 4.15: התפלגות השדה המקביל למישור הסרט: א. מבט תלת מימדי; ב. מבט על; ג. מבט צד; בכל הגרפים ניתן להבחין כי רכיב זה של השדה גדל מהליפוף ה-76 לעבר הליפופים הקיצוניים, כשערכו מקסימאלי בליפופים הפנימיים.

השוואה בין הערכים המקסימאלי של הרכיבים עולה כי זה של השדה המקביל כמעט כפול מערכו של זה הרדיאלי. עובדה זו משפיעה על התפלגות הזרם בחוט, כיוון שאף שהשפעתו על הזרם הקריטי נמוכה ביחס לרכיב האנכי, לא ניתן להתעלם מהשפעת הרכיב המקביל של השדה.

באיור מספר 4.16 מובא הערך האבסולוטי של השדה המגנטי על פני הסליל המתקבל מחיבור שני הרכיבים בכל נקודה בסליל.



איור 4.16: התפלגות השדה הכולל בסליל

באיור 4.17 מתוארת התפלגות הזרם בסליל. התמונה המתקבלת כאן הינה תמונה הפוכה להתפלגות השיור לתוד המגנטי המקביל. ניתן לראות השדה המגנטי הרדיאלי. בנוסף ניכרת בבירור השפעתו של רכיב השדה המגנטי המקביל. ניתן לראות שלאורך כל הסליל, מרכז החוט (או תת הלולאה המרכזית) נושא את מקסימום הזרם החשמלי.



איור 4.17: התפלגות הזרם I=66A על פני הסליל. התפלגות הזרם אינה הומוגנית- בלולאה בה התפלגות הזרם היא המתונה ביותר (הלולאה הראשונה) נושאת תת-הלולאה במרכז החוט פי 1.7 מתת-הלולאה בשפה . בתת הלולאה ה-76 מגיע הבדל זה למקסימום של פי 2.6.

בלולאות הראשונות התפלגות הזרם לרוחב החוט מתונה יותר מהלולאות במרכז הסליל, בהתאם להתפלגות הראשונות התפלגות הזרם הוא הגבוה ביותר היא הלולאה ה-להתפלגות השדה המתוארת לעיל. הלולאה בה השינוי בהתפלגות הזרם הוא הגבוה ביותר היא הלולאה ה-73, שם תת הלולאה המרכזית נושאת פי 2.6 זרם מתת הלולאה הקרובה לשפה. הלולאה בה השינוי בהתפלגות הזרם הנו הנמוך ביותר היא הלולאה ה- 1, שם תת הלולאה המרכזית נושאת פי 1.7 זרם מתת הלולאה הקרובה לשפה.

הערכים לשדה החשמלי, E, הינם ערך ממוצע של השדה החשמלי על פני כל הסליל. ערך ממוצע של השדה החשמלי של כל לולאה כפונקציה של מיקום הלולאה, כאשר זורם בליל הזרם הקריטי ניתן לראות באיור 4.18.



איור 14.18: השדה החשמלי הממוצע ללולאה E כפונקציה של מיקום הלולאה. האזור שבו ישנם הפסדי אנרגיה הגדולים ביותר הנו בסביבות הלולאה ה-12. לעומת זאת ישנם אזורים בהם לא מתפתח מתח משמעותי (אזור הליפוף ה-100).

מהתבוננות באיור עולה שהתפלגות השדה החשמלי נעה בין $-0.3 \ E_c$ בליפוף הרחוק ביותר ממרכז מהתבוננות באיור עולה שהתפלגות השדה החשמלי נעה בין $-0.3 \ E_c$ בליפוף הרחוק ביותר ממרכז הסליל, לבין $-1.6 \ E_c$ בליפוף ה-1.6 בליפוף הסליל, שהוא זו מפתיעה, לאור העובדה שבעבודות קודמות^{26,25} הוזנח רכיב השדה המקביל, והובא בחשבון רק רכיב השדה המגנטי הרדיאלי, שהוא הדומיננטי בקביעת התפלגות הזרם. כתוצאה מכך מגיעים למסקנה מוטעית כי דווקא בליפופים האמצעיים הרזמיננטי בקביעת התפלגות הזרם. כתוצאה מכך מגיעים למסקנה מוטעית כי דווקא בליפופים האמצעיים ($-1.6 \ E_c$), צפוי להתקבל מתח מקסימאלי. אולם, בהביאנו בחשבון את כל זוויות השדה המגנטי האפשריות,

אנו מגיעים לתוצאה שונה וחשובה הנותנת לנו מידע על האזורים הרגישים בסליל בהם הפסדי האנרגיה הם הגבוהים ביותר. מהתבוננות בהתפלגויות הרכיבים השונים של השדה המגנטי דבר מובן. הליפופים הראשונים חשופים לערכים גבוהים של שדה מגנטי כולל ולכן המתח המצטבר בתחילת הסליל גבוה כמוראה באיור 4.18.

מתוך כך אנו מגיעים למסקנה כי אסור להזניח את הרכיב המקביל של השדה המגנטי, שהוזנח בעבודות קודמות, כיוון שהינו משמעותי בעת ניתוח התנהגות הסליל הן מבחינה תרמית והן מבחינה חשמלית. נוכל לדוגמא, לעבות בסרט כפול את האזורים הקרובים למרכז הסליל עליהם מצטבר שדה חשמלי גבוה או לגבות אותם מבחינה תרמית וכדו'.

| ה, וס,כום התוצאות והתאמתן | וינמצאים במעבו | <u>а,),)0</u> | 1 20 | מטפו | עבוו | יישמנו | ומתמי | |
|---------------------------|----------------|-----------------|------|------|------|--------|----------|-------------|
| | | | | | | לה 4.1 | נאות בטב | לניסיון מוב |

| (n-value) I-E חדות אפיין | | טי (<i>I</i> c) טי | זרם קרי | L.L. | |
|--------------------------|------|---------------------|---------|--|--|
| ניסיוך | מודל | ניסיון | מודל | 777011 | |
| 13.4 | 14.4 | 84 | 83.6 | פנקייק 10 ליפופים | |
| 13.5 | 13 | 75 | 76.5 | פנקייק 20 ליפופים | |
| 13.6 | 12.7 | 65.4 | 66.2 | פנקייק 100 ליפופים | |
| 11.7 | 13.1 | 76 | 76.4 | סליל מורכב מ- 2 פנקייקים 10 ליפופים כ"א | |
| 10.7 | 11.5 | 44 | 46 | סליל מורכב מ- 3 פנקייקים 100* ליפופים | |

טבלה 4.1: הפרמטרים I_c ו- n של סלילי Bi-2223 כפי שנתקבלו במודל בהשוואה למדידות ניסיוניות של אפיין 3.1 טבלה 1.1: *I-E*

מהנתונים המופיעים בטבלה ניתן לראות כי הדיוק בחיזוי I_c הנו בממוצע 98%~, כשהשגיאה המקסימלית היא 4%, וב-n, כ- 93% ו-10% בהתאמה.

התוצאות שקיבלנו מהסימולציה שופכות לראשונה אור על המתרחש בסליל, עת אשר זורם דרכו זרם חשמלי, ומאפשרות לתכנן תנאים אידיאלים לפעולתו השוטפת. המודל המתמטי הפך לכלי חשוב וחיוני לתכנון סלילים מוליכי על HTS במעבדתנו.

פרק 5- סיכום ומסקנות

Bi-2223 בעבודה זו הצגנו מודל המאפשר לנו לחזות את אפיין I-E של סליל המלופף מסרט מוליך על Bi-2223 רב סיבי החשוף לשדה מגנטי עצמי לא הומוגני. במודל זה התבססנו על מדידות אפיין I-E ניסיוניות של סרט בודד תחת עוצמות וכיווני שדה הומוגני שונים. בנוסף, באמצעות מודל זה הצלחנו לשפוך אור גם על התפלגות הזרם השדה המגנטי והשדה החשמלי בסרט לאורך הסליל.

חומרים HTS הומרים האופיינים ע"י עקומת *I-E* לא ליניארית כאשר ומעריך החזקה *n* הינם פרמטרים הומרים E בנוסחה $E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n$ הניסים אלו תלויים בקריטריון המתח $E_c = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n$ הניסיונו יש לקריטריון זה הנו 1 $\mu V/cm$. הניסיון מראה כי שדה מגנטי גורם לירידה חדה בפרמטרים אלו ולכיוונו יש

כאשר משווים עקומת *I-E* של סרט על מוליך בודד עם עקומת *I-E* של סליל המלופף מסרט זהה, נוכחנו ל-לראות כי ישנו הבדל משמעותי בערכי פרמטרים אלו (ערכו של I_c בסליל בעל 100 ליפופים מגיע ל-50% מערכו בסרט יחיד וערכו של n הנו כ- 75% מערכו בסרט יחיד). הראינו ששוני זה נובע מהשדה המגנטי העצמי של הסליל המשפיע על תכונות ההולכה של הסרט העל-מוליך. השדה איננו הומוגני ולכן כל אזור במרחב הסליל חשוף לתנאים שונים של שדה מגנטי ומראה תכונות הולכה שונות.

למציאת אפיין *I-E* של סליל והתפלגות השדה המגנטי והזרם בסליל טרם ליפופו, נודעת חשיבות לצורך איתור הנקודה החלשה בה הפסדי אנרגיה הגבוהים ביותר. לכן, בעבודה זו התמקדנו בבניית מודל חישובי המאפשר להשיג מטרות חשובות אלה. הבעיה איננה פשוטה, כיוון שהתפלגות הזרם והתפלגות השדה בסליל תלויות הדדית והבעיה צריכה להיפתר בשיטה רקורסיבית תחת הנחות מסוימות.

לצורך כך בנינו מערכת לשם ביצוע מדידות ניסיוניות בחוט בודד תחת השפעת שדה מגנטי חיצוני הומוגני ובזוויות שונות ביחס למישור הסרט. מדידות אלה אפשרו לנו לקבל את הפרמטרים I ו- n עבור כל עצמה וכיוון של שדה מגנטי להם חשוף הסליל. ביססנו את השיטה על הנחה עיקרית אחת והיא שחילקנו את הסליל לאלמנטים קטנים דיו כך שהשדה המגנטי בתוך כל אלמנט אחיד, ולכן הפרמטרים שלו זהים לאלה של סרט תחת שדה מגנטי הומוגני זהה המתקבלים מהמדידות.

אסרט, ביחס לרוחב 10-0.35T בתחום שדות Bi-2223 ביחס ביחס לרוחב הסרט, בוצעו על סרט I-E בוצעו על סרט I-E בתחום שדות $f(\boldsymbol{\theta})$ המקיימת 57 K בטמפרטורה אסר הזרם הקריטי

ומעריך החזקה- $n(B, \theta)$ מצומצמים לתלות $I_c(B^*)$ ו ו $I_c(B^*)$, והראנו כי התוצאות שקיבלנו $n(B, \theta)$ מעריך החזקה ומעריך החזקה עלינו לבצע מדידות $I_c(B)$ ו ו- (B^*) עבור שדה מתאימות בקירוב לתלות זו. על מנת למצוא את $f(\theta)$ עלינו לבצע מדידות מדידות מתאימות בקירוב לתלות זו. על מנת למצוא הת להסרט בלבד ומהם ניתן לקבל את הזרם הקריטי ומעריך החזקה בקירוב טוב עבור כל כיוון אחר של השדה.

התוצאות שהתקבלו במדידות הניסיוניות שמשו לנו בסיס נתונים למודל החישובי שתוכנת באמצעות תוכנת MatLab. במודל זה בנינו סט של N משוואות לא ליניאריות ב-N משתנים וביצענו אופטימיזציה לקבלת פתרון יחיד. את התפלגות השדה המגנטי חישבנו מתוך חוק ביו-סבר שאמנם צורך זמן CPU ארוך יחסית, אולם נותן את התוצאות האמינות והטובות ביותר. חישוב התפלגויות השדה המגנטי והזרם בסליל נעשה בשיטה רקורסיבית עד התכנסות לשדה החשמלי הנמוך ביותר.

תוצאות המודל שופכות אור על המתרחש בסליל עת זורם דרכו זרם חשמלי. באמצעות מודל זה אנו מקבלים לראשונה תמונה מלאה של התפלגויות השדה המגנטי, הזרם החשמלי והשדה החשמלי בסליל מקבלים לראשונה תמונה מלאה של התפלגויות השדה המגנטי, הזרם החשמלי והשדה החשמלי בסליל עבור כל זרם בתחום רחב בו עקומת $I - \overline{E}$ מקיימת את המשוואה $E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n$ מקיימת את המשוואה ניתן לדמות כל סליל בתצורה גלילית המלופף מחוט Bi-2223 ולתכנן סליל על פי צרכים ספציפיים.

רשימת מקורות

- ¹ H.K. Onnes, Leiden Comm. 120b, 124c (1911), (from: M. Tinkam, "Introduction to superconductivity". McGraw-Hill, New-York, (1996)).
- ² J.G. Bednorz, and K.A. Müller, "*Possible high T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O system*". Z. Phizik B **64**, 189 (1986).
- ³ M.K. Wu, J.R. Ashburn, C.J. Torng, P.H Hor, R.L. Meng, L. Gao, Z.J. Huang, Y.Q. Wang, and C.W. Chu, "Superconductivity at 93K in a new Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure". Phys. Rev. Lett. **58**, 901 (1987).
- ⁴ H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi, and T. Asano, "A new high T_c oxide superconductor without a rare earth element". Jpn J. Appl. Phys. 27, L209 (1988).
- ⁵ Z.Z. Sheng, and A.M. Hermann, "Bulk superconductivity at 120K in the Tl-Ca/Ba-Cu-O system". Nature **332**, 138 (1988).
- ⁶ A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo, and H. R. Ott, "Superconductivity above 130K in the *Hg-Ba-Ca-Cu-O system*". Nature **363**, 56 (1933).
- ⁷ A.A. Abrikosov, J. Experim. Theoret. Phys. (USSR) **32**, p.1442, (1957) (Translation: Soviet Phys. JETP **5**, 1174, (1957)).
- ⁸ C.P. Bean, "Magnetization of hard superconductors". Phys. Rev. Lett., 250 (1962).
- ⁹ C.P. Bean, "Magnetization of high-field superconductors", Rev. Mod. Phys., 31 (1964).
- ¹⁰ M .Tinkham, "Introduction to superconductivity". p.157, McGraw-Hill, Inc. (1975).
- ¹¹ Noam Shaked, PhD. Thesis, "Electromagnetic Power Devices Based on High Temperature Superconductors". (2002)
- ¹² Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff, A. Shaulov, "Magnetic relaxation in high-temperature superconductors". Rev. Mod. Phys. **68**, 911 (1996).

- ¹³ Y. Yeshurun and A. P. Malozemoff, "Giant Flux Creep and Irreversibility in an YBaCuO Crystal: An Alternative to the Superconducting-Glass Model" Phys. Rev. Lett. 60, 2202 (1988).
- ¹⁴ G. Blatter, MV. Feigelman, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin and V. M. Vinokur, Rev. Mod. Phys.**66**, 388 (1994).
- ¹⁵ P.W. Anderson, "Theory of flux creep in hard superconductors" Phys. Rev. Lett. 9, 309 (1962).
- ¹⁶ J.J. Rabbers, "AC Loss in Superconducting Tapes and Coils", Ph.D. Thesis, University of Twente, 2001.
- ¹⁷ Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, Dresden, Germany (from: <u>http://www.ifw-dresden.de/ifs/32/struc/struc4_e.htm</u>).
- ¹⁸ Q.Y. Hu, R.M. Schalk, H.W. Weber, H.K. Liu, R.K. Czurda, and S.X. Dou, "Anisotropy of the critical current in silver sheathed (Bi,Pb) Sr Ca Cu O tapes". J. Appl. Phys. 78, 1123 (1995).
- ¹⁹ Q.Y. Hu, H.K. Liu, H.W. Weber, and S.X. Dou, "Microstructure anisotropy and critical currents in silver-sheathed Bi-2223 tapes". Physica C 282-287, 2591 (1997).
- ²⁰ T. Nakamura, T. Yamamoto, S. Tsuchiya, A. Fujio, T. Hoshino, I. Muta, S.S. Oh, and H.S. Ha, "Anisotropy of critical current and glass-liquid transition flux density in Bi-2223/Ag tape". Supercond. Sci. Technol. **13**, 1521 (2000).
- ²¹ J. Pitel and P. Kovác, "Influence of external magnetic fields on critical currents of solenoids wound with anisotropic HTS tapes - theoretical analysis". Supercond. Sci. Technol. 10, 7 (1997).
- ²² J. Pitel, P. Kovác, and I. Husek, "Upper limit of the critical currents and magnetic fields of cylindrical coils made of Bi(2223)Ag tapes with reduced I -anisotropy". Supercond. Sci. Technol. 12, 62 (1999).

- ²³ Y. Wolfus, Y. Fleger, A. Friedman, F. Kopansky, B. Kalisky, and Y. Yeshurun, Z. Bar-Haim, Z. Ron, L. Ying, and N. Pundak, "*Estimation of the critical current of BSCCO coils based on the field dependent I–V curves of BSCCO tapes*" Physica C, **401**, 222 (2004).
- ²⁴ J.Pitel, , A.Korpela, J.Lehtonen, and Kováč, "*Mathematical model of voltage–current characteristics of Bi*(2223)/Ag magnets under an external magnetic field". Supercond. Sci. Technol. **15**, 1499 (2002).
- ²⁵ J. Lehtonen *et al.* " Influence of self-field on the critical current of Bi-2223/Ag tapes "
 Physica C 403 257 (2004).
- ²⁶ J. Schwartz and H.W. Weijers, "*Electrical measurements on superconductors by transport*", Characterization of materials Vol. I, ed. E.N. Kaufmann, John Wiley & Sons, Inc. p. 472-489 (2003).
- ²⁷ Mika Masti, Jorma Lehtonen, Raine Perala, Wansoo Nah, Joonsun Kang "Comparison of voltage-current characteristics of high quality Bi-2223 tapes with Hall-sensor measurements and computed current density distributions". Physica C, **401**, 155 (2004).
- ²⁸ N. Shaked, A. Friedman, M. Sinvani, I. A. Al-Omari, Y. Wolfus, A. Shaulov and Y. Yeshurun, "Effects of external magnetic field on the critical current in single and bifilar Bi-2223 tapes". Physica C, **354**, 237 (2001).
- ²⁹ P. H. Kes, J. Aarts, V. M. Vinokur, and C. J. van der Beek, "Dissipation in highly anisotropic superconductors". Phys. Rev. Lett. **64**, 1063 (1990).
- ³⁰ P. Vase, R. Flükiger, M. Leghissa, and B. Glowacki, "*Current status of high-Tc wire*". Superconductor Science and technology **13**, p. R71 (2000).
- ³¹ O. van der Meer, B. ten Haken, and H.H.J. ten Kate, "A model to describe the angular dependence of the critical current in a Bi-2223/Ag superconducting tape". Physica C, **357-360**, 1174 (2001).
- ³² L.N. Bulaevskii, L.L. Daemen, M.P. Maley, and J.Y. Coulter, "*Limits to the critical current in high-Tc superconducting tapes*". Phys. Rev. B **48**, 13798 (1993).

- ³³ O.A. Shevchenko, J.J. Rabbers, A. Godeke, B. ten Haken, and H.H.J. ten Kate, "*AC loss in a high-temperature superconducting coil*". Physica C, **310**, 106 (1998).
- ³⁴ O.A. Shevchenko, J.J. Rabbers, A.Godeke, B. Ten Haken and H.H.J Ten Kate: "Angle dependency of AC losses in a BSCCO-2223 tape – simulation and experiment". Presented at EUCAS '99, Institute of Physics Conference Series 167, 879 (1999).