חשמלי האחראים להתפתחות שדה חשמלי Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10-δ} ו-YBa₂Cu₃O_{7-δ} בחוטי בתגובה לשדה מגנטי חילופי

גרגורי לוקובסקי

עבודה זו מוגשת כחלק מהדרישות לשם קבלת תואר מוסמך במחלקה לפיסיקה של אוניברסיטת בר-אילן

דצמבר 2006

טבת תשס"ז

רמת-גן

תוכן העניינים

1. תקציר	1
2. מבוא	3
רקע	3
תכונות של מוליכי על	3
שימושים של מוליכי על בטמפרטורות גבוהות	11
עבודות קודמות	14
מטרת העבודה	18
3. תהליכי מדידה ומערכות מדידה	19
תהליכי מדידה	19
E-I תרשים מערכות המדידה של E(t) ועקומות	23
4. מדידות	26
E-I מדידות	26
E(t) מדידות	34
5. דיון	43
E-I תוצאות מדידות של עקומות	46
E(t) תוצאות מדידות של	53
אנליזה של הגרפים של E(t) בעזרת טראנספורמציית פורייה	56
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10-\delta}$ -ו $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ הוטי	59
6. סיכום	61
7. ביבליוגרפיה	64

תקציר

בעבודה זו אנו חוקרים לראשונה את הפסדי האנרגיה בחוט מוליך-על תעשייתי מסוג בעבודה זו אנו חוקרים לראשונה את הפסדי האנרגיה בחוט מוליך-על תעשייתי מסוג Cu-O צומ-DC במישור VBcO) אשר זורם בו זרם DC במישור עליו שדה מגנטי חליפי בניצב למישורים הללו. בעבודה מדדנו עקומות של שדה חשמלי כנגד בזרם (E-I) בתדירויות ואמפליטודות שונות. בנוסף, מדדנו את השדה החשמלי התלוי בזרם (E-I) בתדירויות ואמפליטודות שונות. בנוסף, מדדנו את השדה החשמלי התלוי בזרם (E-I) במישור השנטי השנטי החליפי. בזרם (E-I) בתדירויות ואמפליטודות שונות של השדה המגנטי החליפי. בזמן (דות שנות של השדה המגנטי החליפי. בזמן את התוצאות שהתקבלו בחוטי אמפלידוטודות שנות של השדה המגנטי החליפי. השוונו את התוצאות שהתקבלו במדידות התבצעו השוונו את העבור חוטי Bi2Sr₂Ca₂Cu₃O_{10-δ}. כל המדידות התבצעו בטמפרטורה של K

במדידות של עקומות E-I מצאנו כי הפעלת שדה AC גוררת הופעת מתח חשמלי במדידות של עקומות DC בעל אותה מתחת לזרם הקריטי, כלומר בזרמים בהם לא הופיע מתח בשדה DC בעל אותה עוצמה. השדה החשמלי עולה הן עם התדירות והן עם האמפליטודה. בתדרים נמוכים מתחת לתדירות סף התלויה בשדה, לא ניתן לתאר את העקומות E-I באמצעות חוק מתחת לתדירות סף התלויה בשדה, לא ניתן לתאר את העקומות I_c תחת I_c , בשני החוטים חזקה עם חזקה קבועה. העקומות מציגות מעבר מחזקה 2~ תחת I_c , בשני החוטים אניתן המקה עם הזקה בשדה העקומות לתדירות הסף התלויה בשדה, לחזקה לחזקה אבל ניתנות לתדירות הסף התלויה בשדה העקומות לחוק חזקה אבל ניתנות לאפיון ע"י פולינום הסף התלויה בשדה העקומות לחוק חזקה אבל ניתנות לאפיון ע"י פולינום הסף התלויה בשדה העקומות לא מתאימות לחוק חזקה אבל ניתנות לאפיון ע"י פולינום מסדר שני.

 I_c מדידות של E(t) מציגות התנהגויות שונות מעל ומתחת I_c : בזרמים קטנים מ- I_c מדידות של E(t) מדידות של הסיגנל הוא סינוסוידאלי, אינו בפאזה יחסית לשדה המגנטי החיצוני ורכיב ה-DC של הסיגנל מולה עם הזרם. בזרמים מעל $-1.1I_c$, הסיגנל סינוסוידאלי, בפאזה עם השדה הסיגנל עולה עם הזרם. בזרמים מעל הסיגנל מציג מדים הסיגנל מוסיד ורכיב ה-DC של הסיגנל מולה עם הזרם. בסביבת I_c הסיגנל מציג התנהגות מורכבת יותר. בכל חצי מחזור של הסיגנל מופיעה "כתף" הנובעת מענה. או מסופרפוזיציה של הסיגנלים מתחת ומעל גו

התנהגות דומה נצפתה בכל האמפליטודות של השדה המגנטי החליפי. מתחת לאמפליטודת סף התלויה בתדירות, הסיגנל של (E(t) אינו בפאזה עם השדה המגנטי החיצוני. מעל לאמפליטודת סף זאת הסיגנל הוא בפאזה. באזור של המעבר בין

ההשפעה של שינוי בתדירות השדה המגנטי החיצוני היא נראית איפא כך: בתדרים נמוכים הסיגנל של E(t) בפאזה עם השדה המגנטי. מעל תדירות סף התלויה באמפליטודה השינוי בפאזה בין הסיגנל לשדה מגנטי חיצוני גדל עם הזרם או/ו אמפליטודה.

את ההתנהגות השונה בזרמים הנמוכים ובזרמים הגבוהים, הן ב-E(t) והן ב-E, אנו מסבירים ע"י קיום של שני מנגנונים פיזיקאליים. המנגנון האחד, הדומיננטי בזרמים נמוכים, הוא תולדה של מציאותו של שדה מגנטי AC והוא מתואר ע"י מודל "ההתנגדות הדינאמית": שבירת הסימטריה של התפלגות האינדוקציה המגנטית בגלל נוכחות הזרם גורמת לכך שחלק מן הפלקסונים נכנסים למוליך העל מצדו האחד של הדגם ויוצאים מצדו השני; תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך שהמתח החשמלי הממוצע איננו אפס. המנגנון השני, הדומיננטי בזרמים גבוהים, הוא המנגנון המוכר הנובע מזחילת שטף (flux creep); הפלקסונים נעים בגלל שבזרמים גבוהים ו/או אמפליטודות גבוהת פוטנציאל הלכידה קטן.

השוואת התוצאות בשני סוגי החוטים YBCO ו-BSCCO מחזקת את ההסבר שהוצע לעיל. בזרמים נמוכים, מצאנו תגובות דומות בשני החוטים כפי שמנבא מודל "התנגדות הדינאמית". בזרמים גבוהים ותדירויות נמוכות BSCCO ו-YBCO מציגים חזקות שונות (15~ ו-25~ בהתאמה) כפי שמצופה בגלל השוני בגודל של פוטנציאל הלכידה.

התמונה הפיזיקאלית המצטיירת מהמדידות שלנו היא שבזרמים נמוכים פוטנציאל התמונה הפיזיקאלית המצטיירת מהמדידות שלנו היא שבזרמים נמוכים פוטנציאל הלכידה (U) חזק מספיק כדי להקטין את האפקטים של זחילת שטף בהשוואה לאפקטים של שדה חליפי. מעל I_c פוטנציאל זה קטן יחסית והוא הגורם העיקרי לאיבודי אנרגיה. מעבר דומה מתקבל ע"י שינוי אמפליטודה ו/או תדירות של השדה המגנטי. כאשר האמפליטודה של הגדלת חלון הזמן של הניסוי. U.

מבוא

הפסדי אנרגיה במוליכי על הנגרמים כתוצאה משדות מגנטיים נחקרים בעולם זמן רב. כיוון שרוב התקני החשמל עם מוליכי על חשופים לשדות מגנטיים קבועים ומשתנים ישנה חשיבות רבה לחקירה של ההפסדים בנוכחות שדות כאלה. זה הוא נושא המחקר של העבודה הנוכחית.

רקע

תכונות של מוליכי על

מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות הם מוליכי-על מסוג II. במוליכים אלו קיימים מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות הם Meissner state (20 השדה המגנטי קטן משדה הקריטי שלושה מצבים (20 מיות מס' 1): Meissner state מצב מעורב (mixed state) התחתון, לא חודר לחומר והתנגדות שווה לאפס. מצב מעורב (mixed state) בנוכחות שדה מגנטי הגדול משדה הקריטי התחתון H_{c1} וקטן משדה הקריטי העליון בנוכחות שדה המגנטי הגדול משדה הקריטי התחתון H_{c1} וקטן משדה הקריטי העליון בנוכחות שדה מגנטי הגדול משדה הקריטי העליון H_{c1} וקטן משדה המגנטי הגדול משדה הקריטי העליון במצב המערב השדה המגנטי הגדול משדה הקריטי העליון H_{c1} וקטן משדה המגנטי. אזי למוליך-על תכונות של מוליך רגיל.



II ציור מספר 1 – דיאגרמת פאזות מוליך-על סוג

בעבודה זו, חומר מוליך-על בטווח של כל האמפליטודות של השדה מגנטי AC וזרמי DC נמצא במצב מעורב. כאשר מוליך-על במצב מעורב הפלקסונים בתוך החומר נעים בגלל כוח לורנץ. הפגמים בחומר יוצרים "מרכזי לכידה" אשר מונעים מפלקסון לזוז. כל עוד שרוב הפלקסונים לא זזים התנגדות של מוליך-על היא אפסית. תנועה של פלקסונים גורמת להיווצרות של שדה חשמלי והתנגדות שונה מאפס.

כאשר מעבירים זרם דרך חוט מוליך-על זרם חשמלי, אנו מגדירים זרם קריטי כאשר מעבירים זרם דרך הוט מוליך-על זרם חשמלי, אנו מגדירים זרם קריטי אזי שמתחתיו אין איבודי אנרגיה משמעותיים אבל כשהזרם עולה מעל זרם קריטי אזי המתחתיו אין איבודי אנרגיה משמעותים אבל כשהזרם בשהזרם עולה מעל זרם הים המתחתיו של הים הנגיה משמעותים אבל $(U = U_0 \ln \left(\frac{J_{c0}}{J} \right)^{-1})$ מתנהג לפי חוק חזקה של מוטנציאל הלכידה של מער מענים הים מענהג לפי חוק חזקה ב

(2.1)
$$E = B \times v = Bv_0 e^{-\frac{U}{kT}} = Bv_0 e^{-\frac{U_0}{kT} \ln\left(\frac{J_c}{J}\right)} = E_0 \left(\frac{J}{J_c}\right)^{\frac{U}{kT}} = E\left(\frac{I}{I_c}\right)^{\frac{U}{kT}}$$

מעל הזרם הקריטי, במוליך-על מופיע מתח חשמלי הנוצר עקב אבודי אנרגיה הקשורים לתנועת הפלקסונים בחומר. חייבים לציין שמתח זה קטן בהרבה ממתח הנוצר באותם תנאים במוליך רגיל.

אחד הגורמים המשפיעים על גודל של הזרם הקריטי חוץ משדה מגנטי חיצוני וטמפרטורה הוא ה-Pinning. בזמן שפלקסון ניכנס לתוך החומר המוליך-על הוא ינוע בכיוון הכוחות הפועלים עליו אבל הוא גם יכול להיתפס ע"י מרכזי לכידה ולהישאר נייח עד שהכוחות יהיו גדולים מהכוח המחזיק אותו במקום. ככל שהחומר נקי יותר כך לפלקסון קל יותר לזוז בתוכו. ככל שיש יותר מוקדי לכידה בחומר כך יותר פלקסונים יהיו תפוסים בהם והזרם הקריטי יהיה גבוה יותר. בציור ציור מס' 2 אנו ממחישים נקודה זאת ע"י ציור סכמתי של שתי עקומות E-I עם מספר דפקטים שונה; הקו



ציור מספר 2. גרף אופייני של המתח כתלות בזרם, ככל שמוסיפים יותר מזהמים כך גדל הזרם הקריטי והגרף זז בציר X (זרם)

כאשר מפעילים שדה מגנטי חיצוני על הדגם שזורם בו זרם יש אינטרקציה בין שני זרמים (הזרם בליבה של הפלקסון וזרם הטרנספורט). הכוח הפועל ביניהם הוא כוח לורנץ. כיוונו מאונך לזרם ולשדה המגנטי החיצוני. ציור מס' 3.



ציור מספר 3. כיוון פעולת כוח לורנץ מאונך לזרם טרנספורט ולשדה מגנטי חיצוני

כוח לורנץ הפועל על פלקסון בודד הוא $F_L = J \cdot \Phi_0$ נניח שהכוח הממוצע של $F_L = J \cdot \Phi_0$: F_P גדול מכוח לורנץ, מוקדי הלכידה (pinning) הוא F_P . כאשר, כוח הלכידה גדול מכוח לורנץ, הוא $F_P = J \cdot \Phi_0$, הפלקסונים תפוסים ע"י מוקדי הלכידה ואינם זזים. הזרם הקריטי הוא הזרם בו משתווה כוח לורנץ לכוח הלכידה, $F_P = J \cdot \Phi_0$. זרם טרנספורט הגבוה מערך הזרם בו משתווה כוח לורנץ לכוח הלכידה, נועת הפלקסונים בתוך מוליך-על גורמת להפסדי זה עוקר את הפלקסונים ממקומם. תנועת הפלקסונים בתוך הדגם.

אפשר לתאר את התופעות המתרחשות בזמן הפעלת שדה מגנטי וזרם טרנספורט ע"י שלוש תחומים שונים כמתואר בציור מס' 4. בציור רואים שבזרמים קטנים התופעה הגורמת למתח חשמלי היא TAFF) Thermal activated flux flow). כאשר הזרם מגיע לערכו הקריטי מתחיל Flux creep, ובזרמים גדולים מאוד זה הוא ה- Flux מגיע לערכו הקריטי מתחיל flow



ציור מספר 4. בגרף ניתן לראות שלוש עקומות שכול אחד מהם בטמפרטורה שונה. בעקומות מספר 4. בגרף ניתן לראות שלוש מתוארות שלושת המנגנונים המתרחשים בזמן העלייה של הזרם הזורם במוליך-על².

תפלקסונים לכודים בבורות ($J = J_c$), הפלקסונים לכודים בבורות TAFF. כשהזרם קטן מהזרם הקריטי ($J = J_c$), הפלקסונים לכודים הפוטנציאל וכוח לורנץ קטן מדי בשביל לגרום להם לצאת מהבור, פלקסונים יכולים לקפוץ מבור לבור 3 עקב הפלוקטואציות התרמיות. הפלקסונים הללו גורמים למתח

הזורם בדגם בגלל שתי

סיבות: כוח לורנץ חלש יחסית לכוח הלכידה ומספר הפלקסונים המשתתפים בתופעה קטן יחסית. העקומה הנמוכה ביותר בציור מס' 4 היא המתארת את המתרחש בטמפרטורה של 77 K.

דבר נוסף המאפיין את המתרחש הוא שמרכזי לכידה לא שווים בכוח שבו הם תופסים את הפלקסון⁴. ישנם מרכזי לכידה חזקים יותר שפלקסון לא יכול להשתחרר מהם עקב פלוקטואציות תרמיות וישנם מרכזי לכידה חלשים יותר שרוב התופעה (TAFF) מתרחשת בגללם - בור פוטנציאל קטן יחסית ופלקסון יכול לקפוץ לבור אחר עמוק יותר.

דעמית המאפשרת לקווי שטף ("זחילת שטף") נובעת מאקטיבציה תרמית המאפשרת לקווי שטף ($J \approx J_c$), Flux creep "לקפוץ" בין מרכזי לכידה קרובים⁵. בזמן שהזרם קרוב לזרם הקריטי(, עקב הפלקסונים מתחילים לעזוב את מוקדי לכידה שלהם בגלל שתי סיבות: הראשונה, עקב פלוקטואציות תרמיות המתרחשות בחומר והסיבה השניה היא שהכוח לורנץ שגדל עם עליית הזרם עולה על כוח הלכידה שמחזיק את הפלקסונים נייחים. כאשר הזרמים הזורמים בדגם הם בסביבות הזרם הקריטי, אזי לפלקסון יש כיוון מועדף לנוע בו, כפי שניתן לראות בציור מספר 5.



בזמן הזמן הציף-בורות פוטנציאל בלי זרם DC, קו לא רציף-בורות פוטנציאל בזמן מספר 5. קו רציף-בורות פוטנציאל בזמן. שבדגם זורם זרם DC. ישנו כיוון מועדף לתנועת הפלקסונים 3 .

מצב של Flux Flow מתרחש כאשר הזרם גדול בהרבה מהזרם הקריטי (J? J_c), הרמה האנרגטית של הפלקסונים גדולה יותר מאנרגיה של בורות הפוטנציאל. הרמה האנרגטית של הפלקסונים גדולה יותר מוליך על היא אוהמית. הכוח שמזיז את הפלקסונים זוים בחופשיות וההתנגדות של החומר הסובב את הפלקסון היא זו שלא הפלקסונים הוא כוח לורנץ וה"צמיגות" של החומר הסובב את הפלקסון היא זו שלא מאפשרת לו לזז בחופשיות מוחלטת.

השפעה של שדה חילופי וישר על מוליכי-על

מוליך-על מתנהג באופן שונה כאשר מופעל עליו שדה מגנטי DC לעומת שדה מגנטי מוליך-על מתנהג באופן שונה כאשר מופעל עליו שדה מגנטי AC. בנוכחות שדה מגנטי DC, תנועת הפלקסונים נשלטת ע"י תהליכים של זחילת שטף בהם הפלקסונים "מדלגים" מבור פוטנציאל אחד לשני בתהליכים של אקטיבציה תרמית. המצב שונה כאשר מפעילים שדה AC.

כאשר מפעילים שדה מגנטי AC על מוליך-על קיימות שלוש אפשרויות: דחייה של שדה מגנטי, חדירה חלקית וחדירה מלאה של השדה לתוך מוליך-על⁶. במציאות, ב-HTS השלב הראשון כמעט ולא קיים, אלא השדה המגנטי חודר לחומר ישירות אחרי הפעלתו וממשיך לחדור עמוק יותר כאשר מגדילים את האמפליטודה של השדה.

skin depth). במוליך על

לעומת זאת עומק החדירה תלוי באמפליטודה: $B_0/\mu_0 J_c$ ובתדירות⁷: $U_{eff} = U_0 - kT \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$ אנו חייבים לציין שהחדירה של השדה המגנטי לחוטים - $U_{eff} = U_0 - kT \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$ מוליכי-על מסוג BSCCO, יכולה להיות בדרגות שונות: חדירה לפילמנטים - כשהשדה המגנטי עם אמפליטודה קטנה חודר לדגם החוט מתנהג כמו אוסף של חוטים דקים, חדירה מלאה לחוט - כשהשדה המגנטי באמפליתודה גדולה אזי החוט מתנהג כמו אוסף של החוט מתנהג כמו אוסף של חוטים של השדה המגנטי לחוטים של השדה המגנטי עם אמפליטודה קטנה חודר לדגם החוט גדולה אזי החוט מתנהג כמו אוסף של חוטים של החוט גדולה אזי החוט מתנהג כמו אוסף של החוט מתנהג כמו אוסף של החוט מתנהג כמו אוסף של חוטים של החוט גדולה אזי החוט מתנהג כמו אוסים אוד והתנגדות כמו אוסים אוד והתנגדות כמו אוזי חסים אוד החוט גדולים מאוד והתנגדות של החוט גדולה יחסית אזי חלק מהזרם ירום במטריצה.

חדירה מלאה של השדה המגנטי לחומר מתרחשת כאשר האמפליטודה של השדה גדולה מספיק כדי להגיע עד למרכזי של מוליך העל. הזרם המושרה ("זרם קריטי") הוא בגודל קבוע ולא תלוי בשדה מגנטי. זה המודל המפורסם של Bean.

מתחת לזרם קריטי הפלקסונים הנעים בדגם יוצרים מתח חשמלי וההתנגדות של הדגם כבר לא שווה לאפס. המודל המתאר את התופעות הללו נקרא מודל "ההתנגדות כבר לא שווה לאפס. המודל המתאר את התופעות הללו נקרא מודל "ההתנגדות הדינאמית" (dynamic resistance). לפי המודל, בכל מחזור שדה AC עובר מספר מסוים של פלקסונים מצד אחד של הדגם לצדו השני. תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך מסוים של פלקסונים מצד אחד של הדגם לצדו השני. תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך מסוים של פלקסונים מצד אחד של הדגם לצדו השני. תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך מסוים של פלקסונים מצד אחד של הדגם לצדו השני. תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך מסוים של פלקסונים מצד אחד של הדגם לצדו השני. תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך הסוים של פלקסונים מצד הדגם אחד של הדגם לצדו השני. תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך הסוים של מסוים של פרומולי המתואר בציור מס' 6. מודל זה הוצע ע"י 90 סמוצע איננו אפס. המנגנון של מודל זה מתואר בציור מס' 6. מודל זה הוצע ע"י 90 סמוצע איננו אפס. המנגנון של מודל המתואר בציור מס' 6. מודל זה הוצע ע"י 90 סמוצע איננו אפס. המנגנון של מודל התואר בציור מס' 6. מודל זה הוצע ע"י 90 סמוצע איננו אפס. המנגנון של מודל התואר בציור מס' 6. מודל זה הוצע ע"י 90 סמוצע איננו אפס. המנגנון של מודל זה מתואר בציור מס' 6. מודל זה הוצע ע"י 90 סמוצע איננו אסייה של פרופיל השדה המגנטי בדגם בנוכחות ורם סרמורות והוא מסתמך על שבירת הסימטרייה של פרופיל השדה המגנטי בדגם בנוכחות זרם סר



אנטי החשופה החשופה אינסופי החשופה לשדה מגנטי של מוליך-על אינסופי החשופה לשדה מגנטי שנות מספר 6. פרופיל שדה מגנטי של מוליך-על אינסופי החשופה לשדה מגנטי סר שכו שבירת הסימטרייה נובעת מהזרם DC שבירת הסימטרייה נובעת מהזרם הנורם אורכי קבוע AC שבירת הסימטרייה בצד השמאלי של הגרף ושלילי בצדו הימני. AC קטן משדה הגורם לשדה עצמי חיובי בצד השמאלי של הגרף ושלילי בצדו הימני. AC קטן משדה הגורם לשדה עצמי חיובי בצד השמאלי של הגרף השלילי בצדו הימני. AC קטן משדה חדירה מלאה, AC שדה AC גדול משדה חדירה מלאה, AC שדה AC שווה לשדה חדירה מלאה, AC שלאה. AC שדה AC משדה חדירה מלאה.

שבירת הסימטרייה מתקבלת ע"י כך שהזרם הקבוע בדגם תורם תרומה חיובית לשדה בקצה אחד של הדגם ושלילית בקצה השני. כאשר סוכמים את זרם הטרנספורט והזרם המושרה שנוצר ע"י השדה המגנטי בדגם תחת המגבלה שהזרם הכללי אינו יכול לעלות המושרה שנוצר ע"י השדה המגנטי בדגם תחת המגבלה שהזרם הכללי אינו יכול לעלות המושרה שנוצר ע"י השדה המגנטי בדגם תחת המגבלה שהזרם הכללי אינו יכול לעלות I_c על I_c על I_c על I_c על I_c את התפלגות השדה המתוארת בציור מס' 6. מודל זה נשען על מודל AC על הקבלים את התפלגות השדה המתוארת בציור מס' 6. מודל זה נשען על מודל Bean מעל לערך B_p (השדה שבו ישנה חדירה מלאה לתוך הדגם) יגרום לתנועת שטף מצד מתמדת בכיוון מסוים בדגם. כך למשל, עבור זרם נתון, נקבל תמיד תנועת שטף מצד מתמדת בכיוון מסוים בדגם. כך למשל, עבור זרם נתון, נקבל תמיד תנועת שטף מצד השד של הדגם לצדו השני. (a) ו-(b) של הדיור מס' 6 אין מעבר של פלקסונים מצד אחד של הדגם לצדו השני והשדה החשמלי ממוצע שווה לאפס. באיור (c) ניתן לראות שבזמן חצי מחזור של שדה הפלקסונים בשטחים 1.2 נכנסים משמאל ופלקסונים בשטח 3.2 נכנסים מימין. ו-3 נבנסים מימין. העבית השטחים 2.2 נכנסים משמאל ופלקסונים משטחים 2.3 בחצי המחזור השני פור יובאים מהדגם ממיק. לראות שבזמן חצי מחזור של הדיה הפצי המחזור השני פלקסונים בשטח 1.2 נכנסים משמאל ופלקסונים משטחים 2.3 נכנסים מימין. ו-3 נוצי מחזור שני פור ידאים מהדגם מימין. הנוצי מזור, פלקסונים משטחים 2.3 נכנסים מימין. הדגם מצד התוור העני פלקסונים בשטחים 3.1 נכנסים משמאל ופלקסונים בשטח 3.2 נכנסים מימין. נ-3 ניצי מחזור השני ליד. תנועה חד-כיוונית זו מובילה להופעת שדה חשמלי עיד. תנועה חד-כיוונית זו מובילה להופעת שדה חשמלי יד.

המודל הורחב על ידי Brandt ו-Mikitik¹² לגיאומטריות סופיות. בסרט מוליך-על דק המודל הורחב אינו קבוע על דק הנמצא בשדה מגנטי חיצוני במאונך אליו. נמצא שבמקרה הזה הזרם אינו קבוע על

הראו שגם Mikitik-ו Brandt .J_c

בגיאומטריה זו קיים מעבר נטו של קווי שטף מצד לצד בדגם וניתן לצפות לעליה ליניארית במתח החשמלי עם הגדלת תדירות של השדה המגנטי. בגלל שבכל מחזור עובר מספר מסוים (סופי) של פלקסונים בדגם הגורם למתח חשמלי, הגדלת מספר המחזורים בשנייה תגדיל את סך השטף החוצה את הדגם ועקב כך יגדל המתח החשמלי.

כפי שנראה בפרקים הבאים, המודל של ההתנגדות הדינאמית מסביר רק חלק של התוצאות בעבודה זו (זרם DC קטן מזרם קריטי). את החלק השני (מעל זרם קריטי) אנו מסבירים ע"י המודל של flux creep. כאשר זרם גדל מעל הערך הקריטי שלו אזי חוץ מתנועת השטף עקב שדה מגנטי AC נוצרת תנועה גדולה יותר של הפלקסונים הנובעת מכך שהגדלת הזרם מקטינה את פוטנציאל הלכידה.

שימושים של מוליכי על בטמפרטורות גבוהות

במערכות זרם חזק מוליכי על בטמפרטורות נמוכות (LTS) אינם שימושיים דיים כיוון שעלות הקירור גבוהה ומוליכי-העל חשופים לקריסה (quench). למעשה, השימוש במוליכי-על מסוג LTS מצטמצם למקומות בהם נדרש שדה גבוה וניתן לספוג את העלויות הגבוהות ובעיות התפעול המיוחדות הכרוכות בקירור לטמפרטורות אלו כגון מערכות MRI ובעיות התפעול המיוחדות הכרוכות בקירור לטמפרטורות אלו כגון עם גילוי החומרים מוליכי על בטמפרטורות גבוהות, החלו ניסיונות להחדירם לשימוש¹³. הגילוי של HTS היווה פריצת דרך בתחום מוליכות העל בגלל הנגישות הטכנולוגית הפשוטה לטמפרטורות העבודה המתאימות. אולם, יישומם בפועל של הטכנולוגית הפשוטה לטמפרטורות העבודה המתאימות. אולם, יישומם בפועל של הטכנולוגית הפשוטה לטמפרטורות העבודה המתאימות. אולם, יישומם בפועל של הטכנולוגית הפשוטה לטמפרטורות העבודה המתאימות. אולם, יישומם בפועל של הטכנולוגית הפשוטה לטמפרטורות העבודה המתאימות. אולם, יישומם בפועל של אוליכי-על HTS מתעכב בגלל הופעת שדה חשמלי בחומר, הנובע מתנועת הפלקסונים, ואשר גורם להפסדי אנרגיה. נקודת מפתח בדרך לשיפור אפשרות היישום אל מוליכי-על HTS במערכות זרם חזק היא חקירת התכונות הפיזיקליות של חוטי אפשרו להגדיר טוב יותר תנאי עבודה בהם השדה החשמלי והפסדי האנרגיה יאפשרו להגדיר טוב יותר תנאי עבודה בהם השדה החשמלי והפסדי האנרגיה מינימליים. לדוגמא, בגלל האנאיזוטרופיות הגבוהה של HTS, ישנה תלות חזקה מאוד

HTS בכיוון השדה המגנטי הפועל עליהם. עיקר ההפסדים HTS נובעים מרכיב השדה הניצב למישור החוט. אפיון ההפסדים כתלות ברכיב השדה הניצב יאפשר לתכנן סלילים בהם רכיב זה של השדה העצמי יקטן כך שההפסדים יהיו בגבול הדרישות המסויימות של כל יישום ויישום.

מחקרים רבים עוסקים כיום בניסיון להקטין את הפסדי האנרגיה כיוון שהפסדים אלו קובעים את האפשרות להשתמש במוליך-על HTS ביישום כלשהו. במעבדתנו נחקרות התכונות של חוטים מוליכי על מסוג BSCCO וPSCCO אשר נכון להיום משמשים כאבן הבניין לכל יישום המבוסס על HTS. נתאר כאן בקצרה שני פרויקטים יישומיים ששניהם התבצעו במעבדה בבר-אילן, הממחישים את חשיבות המחקר בנושא של השפעת שדה חילופי וישר על מוליכי-על :

1. אגירת אנרגיה בסלילים מוליכי-על Superconducting Magnetic Energy. Storage (SMES)¹⁴.

תכונותיו החשמליות והמגנטיות של מוליך-העל מאפשרות יצירת סלילים המספקים שדה מגנטי גבוה מאוד בנפח מצומצם. באופן עקרוני ניתן לאגור אנרגיה אלקטרומגנטית בסלילים מוליכי-על. האנרגיה אגורה כזרם הזורם בסליל אשר יוצר שדה מגנטי. השימוש באנרגיה זו מתאפשר על ידי פריקת הזרם לתוך מעגל חשמלי. שדה מגנטי. השימוש באנירת אנרגיה בסלילים מוליכי-על הוא בשיפור איכות החשמל עיקר השימוש הצפוי באגירת אנרגיה בסלילים מוליכי-על הוא בשיפור איכות החשמל דהיינו, סליל מוליך-על משמש כמאגר החוצץ בין רשת החשמל המספקת חשמל דהיינו, סליל מוליך-על משמש כמאגר החוצץ בין רשת החשמל המספקת חשמל מלוכלך" (המכיל הפרעות מתח ותדר) לבין הצרכן הרגיש, הדורש איכות חשמל גבוהה. תהליכי הפריקה והטעינה התכופים של הסליל במערכת ה-SMES יוצרים למעשה מצב בו על הסליל מופעל שדה AC על גבי רקע זרם DD הזורם בסליל. למעשה מצב בו על הסליל מופעל שדה AC על גבי רקע זרם סליל. לפיכך, כאמור לעיל, שדה זה גורר תנועת פלקסונים בחוט והפסדי אנרגיה בסליל. לפיכך, קיימת חשיבות רבה לחקר הפסדי האנרגיה בסלילי

(Fault current limiter) FSL - מגביל זרם קצר. 2

HTS בפרויקט שלנו אנו עושים שימוש ברעיון חדשני עליו רשמנו פטנט 15 ובו סליל בפרויקט שלנו אנו עושים שימוש ברעיון חדשני עליו רשמנו פטנט 16 . סליל AC מלופף על הליבה ומחובר בטור לרשת. מכניס לרוויה ליבה מגנטית 16 . סליל AC מלופף על הליבה נמוכה. בעת קצר, הזרם בזרם רשת נומינלי, הליבה ברוויה והרשת "רואה" עכבה נמוכה. בעת קצר, הזרם הגבוה בסליל AC יוצר שדה העולה על השדה DC והפוך לו ולכן מוציא את הליבה מרוויה בסליל השדה שהרשת "רואה" עכבה נמוכה. בעת קצר, הזרם הגבוה בזרם רשת נומינלי, הליבה ברוויה והרשת "רואה" עכבה נמוכה. בעת קצר, הזרם מוזרם רשת מומינלי, הליבה ברוויה והרשת העכבה לחדים במוכה לוויה עכבה למוכה במוכה במוכה הגבוה המגביה שלו הפוך לו ולכן מוציא הליבה מרוויה באופן שהרשת "רואה" עכבה גבוהה המגבילה את זרם הקצר. גם כאן, הסליל מרוויה באופן הרשת שהרשת "רואה" עכבה גבוהה לשדות AC המגיעים בגלל צימוד מגנטי מוליך העל נושא זרם DC אך חשוף חלקית לשדות AC המגיעים בגלל צימוד מגנטי הוליך הליבה. חשיפה זו לשדה AC עלולה להיות זו שתקבע את כדאיות הפעלת ה-FCL עם סלילי HTS.

עבודות קודמות

העבודה של ⁹Andrianov, אותה תארנו בפרק הקודם (עמוד 9-10) היא למעשה העבודה הראשונה שהגדירה את המתרחש במוליך-על מסוג II כאשר מופעל עליו שדה מגנטי AC וזרם DC. מתח DC מופיע במוליך-על כאשר הסימטריה של התפלגות של השדה המגנטי בחומר בעלייה של השדה המגנטי החיצוני שונה יחסית לאמצע הדגם (ציור מסי 6) מהתפלגות השדה המגנטי בחומר בירידה של השדה המגנטי.

עבודה נוספת באותו נושא פורסמה ע"י Ogasawara^{10,11} עבודה נוספת באותו נושא פורסמה ע"י Andrianov נמדדו קונפיגורציות נוספות של פנקייקים וחוטים שהופעל עליהם שדה AC מגנטי

¹⁷Mikitik , Brandt המשך ישיר לעבודה של Andrianov המשך ישיר לעבודה של Mikitik , Brandt המאמר של מוליך-על בזמן שמופעל עליו שדה מגנטי מודל תיאורטי המתאר את ההתנהגות של מוליך-על בזמן שמופעל עליו שדה מגנטי .DC סרי בזמן: $B_0 ? B_1 - B_0 ? B_1$, כאשר $B_0 ? B_1 - B_0 + B_1 \cos \omega t$ ורם זרם .DC הנוסחה המתארת את המתרחש במוליך-על תחת אילוצים האלו היא: DC הנוסחה המתארת את $B_{cr} = \mu_0 j_c \frac{w}{\pi}$, $B^* = 2 \left(1 - \frac{I}{I_c}\right) B_{cr}$ ו $E = \frac{I}{I_c} \frac{2\omega w}{\pi} (B_1 - B^*)$ והשדה המגנטי הוא DC השר אין זרם . $B_{cr} = \mu_0 j_c \frac{w}{\pi}$, $B^* = 2 \left(1 - \frac{I}{I_c}\right) B_{cr}$ ו במוליך-שר אין גרם .BC המתארת את המתרחש במוליך-על תחת אילוצים האלו היא: DC המתארת את המתרחש במוליך-על תחת אילוצים האלו היא: DC הנוסחה המתארת את המתרחש במוליך-על תחת אילוצים האלו היא: DC בל בי מגנטי הוא .CC השדה המגנטי בחומר מתוארת ע"י מודל והשדה המגנטי הוא .CC השדה המגנטי הוא הער אין זרם DC השדה המגנטי בחומר מתוארת ע"י מודל והשדה המגנטי הוא בין האסר אר היקר היי הוד המגנטי בחומר מתוארת ע"י מודל .CC השדה המגנטי הוא .CC השדה המגנטי בחומר מתוארת ע"י מודל .DC בדגם אזי פרופיל הוא סימטרי בכל אמפליטודות של השדה המגנטי בחומר מתוארת ע"י מודל DC בדגם אזי פרופיל הוא סימטרי בכל המפליטודות של השדה המגנטי בחומר מתוארת ע"י מודל DC בדגם בין הוא סימטרי בכל המפליטודות של השדה המגנטי אבל כשנזרים ורם כל הדגם ויצא מהגד השני. תנועה זו של השטף גורמת לתוספת של מתח חשמלי .AC היגם ויצא שונה מאפס ונובעת מכך שהשדה המגנטי המופעל הוא אוא ביעה .AC

בעבודתם של .Mo₃Si נבדקה ההתנהגות של חומר מוליך-על Mo₃Si, כאשר מפעילים עליו שדה מגנטי DC גדול ורכיב AC קטן בכיוון מאונך לדגם וזורם בו זרם מפעילים עליו שדה מגנטי DC. נמצא שבגרפים של E-I יש שני תחומים: אחד ליניארי והשני מעריכי כאשר DC. נמצא התנגדות פרופורציונלית לתדירות של השדה AC ולעוצמה של

DC. בתדירויות נמוכות, בחלק הליניארי של הגרף, רכיב AC גורם לפלקסונים לעבור מצד אחד של הדגם לצדו השני, כאשר עולה הזרם מתחיל flux לפלקסונים לעבור מצד אחד של הדגם לצדו השני, כאשר עולה הזרם מתחיל E-I creep וזה גורם לשבירה של החלק הליניארי. השיפוע של החלק הליניארי בגרף תלוי ליניארית בתדירות ובאמפליטודה. בעבודה זו החוקרים מגדירים ומסבירים בפעם תלוי ליניארית בתדירות ובאמפליטודה. בעבודה זו החוקרים מגדירים ומסבירים בפעם הלוי ליניארי נחומים של עקומות E-I, תחום ליניארי ותחום מעריכי. חשוב לציין הראשונה שני תחומים של עקומות DC הוא אפס ניתן לקבל התנגדות שונה מאפס בזרמים קטנים מזרם קריטי.

בעבודה אחרת, HTS פר al. האחרת שבוצעו במסגרת מחקר הייתה מדידת שמופעל זרם AC (גל מרובע). אחת המדידות שבוצעו במסגרת מחקר הייתה מדידת שמופעל זרם AC (גל מרובע). אחת המדידות שבוצעו במסגרת מחקר הייתה מדידת עקומות E-I השדה המגנטי DC שהופעל היה E-I בגרפים של היה בין שתי תופעות ליניארי בזרמים נמוכים. החוקרים הסבירו את המתרחש ע"י תחרות בין שתי תופעות המתרחשות בזמן שינוי הסימן של הזרם: אחת - גל של פלקסונים שבכניסתם לחומר משנים את תמונת ההתפלגות השדה והשני - רלקסציה מגנטית המתרחשת בין שינוי משנים את תמונת ההתפלגות השדה והשני - רלקסציה מגנטית המתרחשת בין שינוי מימן של המתח. בחלק הישר (מתח שונה מאפס) של המדרגה הפלקסון הנכנס מצד סימן של המתח. בחלק הישר (מתח שונה מאפס) של המדרגה הפלקסון הנכנס מצד בזמן, לעומת זאת הפלקסון שנלכד בבור פוטנציאל גורם לאי סדר בגלל שלא נע עם הפלקסונים האחרים אשר עוברים את הדגם. התלות באמפליטודה ובתדירות של הדגם מתבטאת בכך שיש תחרות של הדגם. התלות לאיבוד אנרגיה.

77 של הופייני Bi-2223/Ag של חוט E-I אופייני Rabbers²⁰ רב סיבי, בטמפרטורה של Rabbers²⁰ א בהשפעת שדה מגנטי AC, שכיוונו מאונך או מקביל לצידו הרחב של החוט, AC בהשפעת שדה מגנטי 35 Hz בהעוצמות שונות בתחום 40-700 Oe ובתדירות קבועה של 35 Hz. הוא מצא שהגדלת השדה המגנטי מעל 100 Oe גורמת להופעת התנגדות כמעט אוהמית עד לזרמים הקרובים לזרם הקריטי (קריטריון 1μ V/cm). ניתוח התופעה הראה שההשפעה של שדה AC ניתנת לתיאור בשני אופנים: על ידי הגדלת המתח CD מרכיין בית לזרמים התנגדות כמעט אוהמית עד לזרמים הקרובים לזרם הקריטי (קריטריון העופנים: על ידי הגדלת המתח CT גורמים היאה אה השפעה של שדה AC ניתנת לתיאור בשני אופנים: על ידי הגדלת המתח כמעט אוהמית עד שההשפעה של שדה AC ניתנת לתיאור בשני אופנים: על ידי הגדלת המתח אה אה התופעה של אדי המתח על סמך מודל "התנגדות דינמית" עבור מוליכי-על את התופעה של עליית המתח על סמך מודל "התנגדות דינמית" עבור מוליכי-על

DC. שבירת הסימטרייה של פרופיל השדה המגנטי מתקבלת. מהעובדה שזרם קבוע בדגם תורם תרומה חיובית לשדה בקצה אחד של הדגם ושלילית בקצה השני^{10,11}.

DC שקד 14 חקר את השפעתו של שדה מגנטי AC שקד את השפעתו של הנושא ארם AC והראה שהפעלת השדה מגנטי AC והראה שהפעלת השדה מגנטי סכינוסואידלי בתדרים אורמת להגדלת מפל המתח DC. הפעלת שדה מגנטי סנטי סכינוסואידלי בתדרים אלס הראתה שקיימת תלות ליניארית בין הזרם הקריטי לבין אמפליטודת השדה ותלות לוגריתמית של n

n העבודה של שקד הותירה מספר שאלות פתוחות, העיקרית שבהן קשורה לתלות של בתדר בתחום של 0-50 Hz. תלות זו אינה עולה בקנה אחד עם הסברים מקובלים לתופעה המתבססים על רלקסציה מגנטית וזחילת שטף או על התנגדות דינמית; מנגנון אחר נדרש להסבר התופעה.

70 Oe במדידות דומות, *רויטברג ²¹* מצא שבאמפליטודות שדה מגנטי AC הקטנות מ- 000 במדידות דומות, *רויטברג ²¹* מצא שבאמפליטודות שדה מגנטי. בתחום זה שדה DC משפיע על אין תלות של השדה החשמלי בתדר השדה המגנטי. בתחום זה שדה 70 oe משפיע על העקומות E-I באותה צורה כמו שדה CC. באמפליטודות שדה מגנטי הגבוהות מ- 0000 ce נבתחום אין תלות של השדה החשמלי בתדר השדה המגנטי. העבודה הראתה כי בתחום Oe נצפתה תלות של השדה ומתקרבים ל-DC, עקומות E-I המתקבלות מתקרבות באופן זה כאשר יורדים בתדר ומתקרבים ל-DC, עקומות I-I המתקבלות מתקרבות באופן רציף לעקומת ה-DC.

במדידות של (E(t) נמצא שכאשר מפעילים שדה מגנטי סינוסואידלי מתקבל שדה חשמלי חיובי בתדר כפול וצורת הגל אינה סינוסואידלית. כמו כן, צורת הגל של השדה החשמלי הינה אסימטרית כך ששני שיאים סמוכים אינם בעלי אותו הגובה.

התוצאות הוסברו בעזרת שילוב של מודל זחילת שטף עם מודל גיאומטרי. רויטברג התוצאות הוסברו בעזרת שילוב של מודל הראה כי השדה AC חודר אל תוך הדגם למרחק התלוי בתדר. באזור אליו חודר

DC השונה מאפס.

: מספר נקודות נשארו פתוחות בעבודתו של רויטברג

חוסר הסימטריה בצורת הגל של שדה חשמלי תלוי בזמן. חוסר הסימטריה מצביע
 למעשה על כך שהשדה החשמלי תלוי בכיוון השדה המגנטי. לכאורה, אין סיבה
 לתופעה כזו והיא נשארת כבעיה פתוחה.

(2) פרטי הדינמיקה של השדה החשמלי עדיין לא נחקרו. כך, למשל, הזזות פאזה התלויות בזרם באמפליטודת השדה המגנטי ובתדירותו, שיאים משניים המופיעים התלויות בזרם באמפליטודת השדה בתחומי שדה ותדר מסוימים ושברים בעקומות (E(t).

חלק מהשאלות שנותרו פתוחות בעבודות קודמות של שקד ושל רויטברג יקבלו תשובה בעבודה זו.

<u>מטרות העבודה</u>

א. הרחבת המדידות ב-BSCCO

<u>חקירת תופעת האסימטריה בשדה חשמלי התלוי בזמן</u>.
 מטרתנו היא איתור הגורם להופעת האסימטריה זו.

2. מיפוי התופעות המתקבלות בעקומות <u>E(t)</u>.

מטרתנו היא מיפוי התופעות תוך דגש מיוחד על השיאים המשניים, השברים והזזות הפאזה המתקבלות כתלות באמפליטודה, בתדר ובזרם DC וקישור בין התופעות הללו לבין הפסד האנרגיה הכולל על פני זמן מחזור.

ב. מדידות ב-YBCO

חוטי הדור השני - שכבות דקות של YBCO במקום החוטים של היום העשויים BSCCO בתוך מטריצת כסף - מצטיינים בצפיפות הזרם הגבוהה שלהם והם נכנסים לשימוש בימים אלו. מערכת YBCO נבדלת מ-BSCCO באנאיזוטרופיה שלה, שהיא קטנה הרבה יותר מזו של BSCCO. כתוצאה מכך, הפלקסונים ב-YBCO שומרים על קורלציה מגנטית אורכית גם בטמפרטורות של חנקן נוזלי, בניגוד ל-BSCCO שם הפלקסונים "מתפרקים" לפנקייקס עם קורלציה אורכית נמוכה בטמפרטורות אלו²².

לשינוי בעוצמת הלכידה צריכה להיות השפעה גם על הפסדי האנרגיה בחוט בתנאי העבודה שלנו. חוטי YBCO הם חדשים יחסית ותכונה זו עדיין לא נבדקה. בנוסף לשינוי במערכת הפיסיקלית הנמדדת, מציעים חוטי ה-YBCO גם שינוי מהותי בגיאומטריה. ממערכת רב סיבית תלת-ממדית אנו עוברים לשכבה דקה של YBCO. בגיאומטריה. ממערכת רב סיבית תלת-ממדית אנו עוברים לשכבה דקה של YBCO. העבודה בוחנת את התאמתם של המודלים המקובלים בתחום לתוצאות הניסיוניות העבודה בוחנת את התאמתם המקובלים המקובלים בתחום לתוצאות הניסיוניות ומציע אפשרויות לשילוב בין מודלים הללו. בנוסף לכך, העבודה דנה בסיבות הפיזיקאליות הגורמות לאבודי אנרגיה בזמן הפעלת שדות מגנטיים AC זרמי טרנספורט.

תהליכי מדידה ומערכות המדידה

תהליכי מדידה

הניסוים המתוארים בעבודה זו בוצעו בחוטים מוליכי על מסוג BSCCO-2223 ו-American Superconductors Corp. (ASC).²³ שנרכשו בהברת YBCO (ASC) הם YBCO הינם החוטים שהשתמשו בהם עד היום בישומי HTS. חוטי ה-YBCO מן הדור ה-II הנכנסים בהדרגה לשימוש תעשייתי.

הוטי BSCOO-2223

החומר המוליך על נמצא בצינוריות כסף בצורת אבקה דחוסה. לאחר הדחיסה, תאי היחידה של מוליך על מסתדרים כך, שצירי c מכוונים בכוון המאונך למישור החוט. האניזוטרופייה הגבוהה של BSCCO גורמת לכך שרגישותו של החוט לשדה מגנטי ניצב לחוט גבוהה הרבה יותר מרגישותו לשדה מקביל. בציור מס' 7 מוצג חתך של חוט ESCCO 2223 המורכב מ-55 סיבים מוליכי העל הנמצאים בתוך מטריצת הכסף.



מטריצת בתוך היושבים פילמנטים 55 בעל 55 בעל מספר HTS מסוג 1
ספר 7 הוט מספר 7. $^{23}_{\rm CO-2223}$

באורך של E-I במדידות של E(t) הוצב קטע חוט BSCCO-2223 באורך של כ-30 ס"מ בין שני סלילים בצורת מסלול מרוצים (racetrack) המייצרים את השדה מגנטי אחיד בכיוון מאונך למישורי חוט. סלילים אלו משמשים ליצירת שדה חילופי

AC חוברו הסלילים דרך מגבר למחולל אות AC (Wavetek 2MHz Synthesizer 650). כניסות הזרם חוברו בקצוות החוט במרחק מספיק ממגעי המתח כך שלא תהיה כניסת חום דרכן. במרכז החוט נמצאים מגעי המתח במרחק 10 ס"מ. מגעים אלו הולחמו באמצע הגאומטרי של הדגם. מגעי מתח מולחמים אל החוט בעזרת חומר לחם עם טמפרטורת המסה הנמוכה מ-20 כדי שלא לפגוע בחוט מוליך-על.

דוטי YBCO

חוטי הדור ה-II הם חוטים מצופים (coated conductors). החוט מורכב משכבת בסיס שעליה שכבת חיץ ואז ציפוי של YBCO, ישנו הבדל משמעותי (יחסית ל-BSCCO) מבחינת העובי האפקטיבי (עובי של שכבת YBCO הוא 1 מיקרון) של השכבה מוליכת-על בחוטים אלה. YBCO הוא מוליך על בעל אנאיזוטרופיה קטנה השכבה מוליכת-על בחוטים אלה. SSCCO ובגלל זה יש חשיבות רבה בחקירתו. דבר נוסף שבגללו נבחר יותר ביחס ל BSCCO ובגלל זה יש חשיבות רבה בחקירתו. דבר נוסף שבגללו נבחר חוט זה לשמש למחקר זה העובדה שיש לו רק פילמנט רחב אחד ולא 55 פילמנטים כמו בחוטי מסוג BSCCO.

המתה DC על החוט נמדד על ידי רב מודד סיפרתי 1271 Netronix Oscilloscope TDS 420 A נרשמה על ידי DC המסופק על Tektronix Oscilloscope TDS 420 A ידי מקור זרם מוזרם דרך הסרט המוליך על. כל ידי מקור זרם 8V-580A Agilent 6681A מוזרם דרך הסרט המוליך על עוברים אל המערכת מבוקרת על ידי מחשב. המתחים המתקבלים על פני מוליך-על עוברים אל מערכת מיתוג אלקטרונית הממתגת בכל פעם ערוץ מתח למדידה במולטימטר רב סיפרתי. מערך המדידה הורכב לצורכי העבודה ותוכנת הבקרה ואיסוף הנתונים נכתבה לצורך זה תוך שימוש בתוכנת View

E-I מדידת

בניסוים נמדדו אופייני E-V בחוטי BSCCO-2223 בניסוים נמדדו אופייני אופייני E-V בחוטי אופייני אופייני (קריטריון קריטי (קריטריון $^{5}A/cm^{2}$ וצפיפות זרם $^{-140A}$ (1 μ V/cm קריטי (קריטריון קריטי (קריטריון $^{-2.05\times10^{7}}A/cm^{2}$ וצפיפות זרם ^{-82}A במהלך הניסוי מונופילמנט בעלי זרם קריטי ^{-82}A

א בתדרים שונים בהשוואה להשפעת AC שדה DC בלבד. העבודה בוצעה באמבט חנקן נוזל ב-T=77 K. המערכת למדידת DC המתח מתוארת בציור מס' 10,11.

מדידות (E(t

בניסוים מדדנו את של השדה חשמלי התלוי בזמן בחוטי BSCCO-2223 ו-YBCO בתדרים במהלך הניסוי הופעל שדה מגנטי חילופי באמפליטודות של 80-500 Gauss בתדרים 2.3-103 Hz ובזרמי A DC בסנטימטר של החוטים. נמדד מתח הנופל לאורך 10 סנטימטר של החוטים. כיוון ששדה מגנטי המופעל בניסוי הוא חלופי. שדה מגנטי AC משרה מתח בחוטי המדידה דרך חוט מוליך-על. על מנת לבטל את המתח המושרה בנינו מתקן מיוחד אשר אפשר הקטנה של המתחים הללו למינימום.

חשיבות המדידה של שני סוגי החוטים

אריך BSCCO-ו YBCO כדי לבצע ניתוח נכון של התוצאות והשוואה בין החוטי את הכון של התוצאות. לדעת את הבדלים בגיאומטריות שלהם וגם את ההבדלים בתכונות הפיזיקאליות. או לדעת את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הבדלים את הוביקאלים לדעת את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הוביקאלים את הוביקאלים את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הוביקאלים בתכונות הפיזיקאליות. לדעת את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הבדלים בתכונות הפיזיקאליות. את הבדלים בגיאומטריות שלהם הביקאלים את ההבדלים בתכונות הפיזיקאליות. לדעת את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הבדלים בגיאומטריות שלהם הביקאליות. את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הבדלים בגיאומטריות שלהם הביקאליות. את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הביקאליות. את הבדלים בגיאומטריות שלהם הביקאליות את הביקאליות הביקאליות את הביקאליות את הבדלים בגיאומטריות שלהם את הביקאליות הביקאליות להם את הביקאליות הביקאליות הביקאליות. את הביקאליות הביות הביקאליות ה

את ב-, BSCCO לעומת את השפעה
$$\gamma = \left(\frac{m_c}{m_{ab}}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_{ab}}\right) = \left(\frac{\xi_{ab}}{\xi_c}\right)$$

האנאיזוטרופיה היא חזקה מאוד כשאין מוקדי לכידה בחומר. בחומרים שנמדדו בעבודה זו יש מספר של מוקדי לכידה שאנו לא יכולים להעריך. למרות שבחוטים SSCCO ו-BSCCO ו-BSCCO יש מוקדי לכידה האנאיזוטרופיה בין החומרים משפיעה על עוצמתו של פוטנציאל הלכידה. בגלל ש- γ ב-YBCO קטנה יותר (אנאיזוטרופיה קטנה, יחסית) צריך להשקיע הרבה יותר אנרגיה כדי להוציא פלקסון מבור פוטנציאל

ב-YBCO מאשר ב-
$$\left(\frac{U}{k_BT}\right)$$
≈ 25 החזקה ב-YBCO מאשר ב-22BSCCO מאשר ב-10 מאשר ב-10 מאשר ב-10 מאשר ב-10 א

 $\left(\frac{U}{k_{B}T}\right) \approx 12$ BSCCO

פתרון בעיית האסימטריה במתח המתקבל בזמן הפעלתו של שדה מגנטי חילופי במדידות הראשונות של (E(t) שבוצעו ע"י רויטברג השדה החשמלי שהתקבל לא היה סימטרי ציור מס' 8. בניסיון לבטל את האסימטרייה סובבו את הדגם יחסית לציר האורכי אבל זה לא נתן שיפור משמעותי. היו ניסיונות להקטין את הלולאה הנוצרת ע"י חוטי מדידה בהחלפה בחוטים דקים יותר. כל הניסיונות הללו לא פתרו את הבעית האיסימטריה²¹. בעבודה זו נראה כיצד הצלחנו לבטל את האסימטריה זו.



ציור מספר 8. שדה חשמלי, הנוצר כתוצאה מהפעלה של שדה מגנטי AC (20 Hz), כתלות בזמן (20 Hz), מספר 8. שדה מגנטי חילופי (20 Hz) באמפליטודה של [Oe] 280 כתלות בזמן (מימין).

בזמן שמפעילים שדה מגנטי על החוט מוליך-על במערכת המדידה המוצגת בציור מס' 10,11 נוצר מתח מושרה בחוט המדידה של המתח. כיוון שהשדה משתנה בזמן וחוט המדידה בעל עובי סופי ונמצא לא באמצע "החשמלי" של החוט מוליך-על, נוצרת לולאה, שמשרה מתח הנוסף למתח הנופל לאורך 10 סנטימטר של מוליך-על. בכל חצי מחזור של השדה המגנטי מושרה זרם בכיוון מסוים אשר נוסף למתח הנמדד המוליך-על. כך אנו מקבלים אות סינוס לא סימטרי כאשר בפיק אחד המתח המושרה נוסף לסיגנל המקורי ובפיק שאחריו הוא מוחסר ממנו. אחת המסקנות שהתקבלו במדידות לסיגנל המקורי ובפיק שאחריו הוא מוחסר ממנו. אחת המסקנות שהתקבלו במדידות היתה שהאמצע הגיאומטרי של החוט המוליך-על אינו האמצע החשמלי" שלו זה



ציור מספר 9. תאור של המכשיר המאפשר להזיז את חוטי מדידת המתח בזמן המדידה. ע"י סיבוב בורג הכיוון במתקן מוזזת הפלטה העליונה (בצבע כתום) ביחד עם חוטי מדידת מתח כך שמקומם ניכווה לאמצע חשמלי ולא אמצע גיאומטרי.



ציור מספר 10. צילום של מערכת המדידה. בחלון הקטן: ברגיי כיוון של קצוות מדידת מתח.



E(t) ו E-I מספר 11. מערכת המדידה של עקומות

מדידות

E-I אפיון החוטים ע"י מדידת עקומות

פרטי המדידות:

בציור מס' 12, מוצגים גרפים של השדה החשמלי כתלות בזרם. השדה המגנטי הופעל בציור מס' 12, מוצגים גרפים של השדה החשמלי כתלות בזרם. השדה מגנטי 220 G (220 G) DC במוליך-על במאונך לדגם כאשר עקומה מס' 1 התקבלה בשדה מגנטי 220 G rms ושאר העקומות בשדות מגנטיים AC (2.3-103 Hz) באמפליטודה 220 G rms ושאר העקומות בשדות מגנטיים DC לחוק החזקה נותנת זרם קריטי 121 A ומעריך DC התאמת של העקומה הראשונה, בשדה DC לחוק החזקה נותנת זרם n=15.

לראשונה בחוטי BSCCO אנו עדים לעובדה ששדה מגנטי AC גורם לשדה חשמלי שונה מאפס בזרמים שבהם שדה מגנטי DC מציג שדה חשמלי אפסי. ניתן לראות זאת שונה מאפס בזרמים שבהם שדה מגנטי DC מציג שדה חשמלי אפסי. ניתן לראות זאת בגרף מס' 12. בגרף נראה בברור שבזרמים קטנים מהזרם הקריטי, בעקומות של השדה המגנטי AC ישנו מתח חשמלי. דבר נוסף הנראה בגרף הוא, שבתדרים נמוכים השדה המגנטי AC ישנו מתח חשמלי. דבר נוסף הנראה בגרף הוא, שבתדרים נמוכים בזרמים גדולים מזרם קריטי הענו מתח חשמלי. דבר נוסף הנראה בגרף הוא, שבתדרים נמוכים השדה המגנטי DC ישנו מתח חשמלי. דבר נוסף הנראה בגרף הוא, שבתדרים נמוכים השדה המגנטי DC ישנו מתח חשמלי. דבר נוסף הנראה בגרף הוא, שבתדרים נמוכים השדה המגנטי DC ישנו מתח חשמלי. ביש השדה המגנטי DC השדה המגנטי את העקומות מתלכדות עם העקומה מס' 1 המייצגת את השדה המגנטי DC העקומות המתקבלות (ציור מס' 12) בסקלה לוגריתמית בציור מס' 13.



ציור מספר 12. בגרף מוצגים מדידות E-I של BSCCO כאשר הקו הראשון הוא שדה מגנטי DC וכל הגרפים האחרים הם בשדה משתנה באמפליטודה של השדה 220 G rms ובתדרים שונים (2.3-103 Hz).

את העקומות הנראות בגרף אפשר לחלק לשני אזורים:

1) תדירויות "נמוכות" 2.3-15 Hz.

בתחום התדירויות הנמוכות בגרף של E-I העקומות מציגות שני אזורים (ציור מס' 13): בזרמים נמוכים ובסביבה של הזרם הקריטי הגרף מציג ההתנהגות מעריכית בחזקה נמוכה. בחלק השני של הגרף בזרמים מעל הזרם הקריטי ההתנהגות היא מעריכית עם חזקה גבוהה. כמו כן אנו עדים לכך שבזרמים גדולים מהזרם הקריטי העקומות מתלכדות עם העקומה מס' 1 (שדה מגנטי DC). בסביבה של הזרם הקריטי אנו רואים מעבר בין שני החזקות.



ציור מספר 13. בגרף מוצגים מדידות E-I של BSCCO בסקלה לוגריתמית. כאשר העקומה הראשונה מציגה שדה המגנטי DC וכל הגרפים האחרים הם בשדה AC באמפליטודה של השדה 220 G rms השדה 220 גבתדרים שונים (2.3-103 Hz).

.23-103 Hz "גבוהות" (2

בתדרים גבוהים ניתן לראות שלעקומות אין חזקה קבועה בזרמים קטנים מזרם קריטי. אנו סבורים שגם בתדרים גבוהים העקומות מתלכדות עם העקומה מס' 1 (שדה המגנטי שלא סבורים גדולים מזרם הקריטי, אבל זה קורה בשדות חשמליים גדולים יותר שלא נמדדו בעבודה זו עקב ההספקים גדולים מאוד אשר יכולים לגרום לחימום יותר של החוט.

בגרף מס' 14 אנו מתמקדים בתדרים הנמוכים של השדה המגנטי AC ובעקומה המתקבלת בשדה המגנטי DC העקומה לשדה DC מציגה חוק חזקה עם אקספוננט AC בשדה המגנטי DC מציגה חוק חזקה עם אקספוננט AC העקומות לשדה AC מציגות בזרמים קטנים מזרם קריטי חוק חזקה עם $^{-15}$. העקומות לשדה AC מגינות בזרמים קטנים מזרם קריטי חוק חזקה עם אקספוננט 2~. בזרמים גדולים מהזרם קריטי עקומות ה-AC מתלכדות עם עקומת אקספוננט 2~. בזרמים גדולים מהזרם קריטי עקומות ה-DC מגנטי חוק חזקה עם בזרמים גדולים מהזרם קריטי עקומות ה-AC מתלכדות עם גדולים גדולים מהזרם קריטי עקומות ה-AC מתלכדות עם גדולים אקספוננט 2~. בזרמים גדולים מהזרם קריטי עקומות ה-AC מתלכדות עם גדולים גדולים מהזרם קריטי עקומות ה-AC מתלכדות עם גדולים גדולים גדולים מהזרם קריטי עקומות ה-AC מתלכדות גדולים גדולים גדולים גדולים גדולים גדולים לשינוי של החזקה המתרחש באותה מדידה.

DC. בסביבה של הזרם הקריטי ישנו

מעבר בין החזקות.



ציור מספר 14. בגרף מוצגים מדידות E-I של BSCCO בסקלה לוגריתמית. כאשר הקו הראשון הוא שדה מגנטי DC והגרפים האחרים הם בשדה משתנה באמפליטודה של השדה 220 G rms ובתדרים של 12.5 ו-4.6 Hz.

לסיכום, על פי המדידות של השדה המגנטי AC אנו מקבלים שדה חשמלי באזורים שבשדה מגנטי DC לא קיים שדה חשמלי. בתדרים נמוכים העקומות הן מעריכיות שבשדה מגנטי DC לא קיים שדה חשמלי. בתדרים נמוכים העקומות הן מעריכיות ומציגות חזקה 2~ בתחום שלפני הזרם הקריטי. בתחום שאחרי הזרם הקריטי החזקה היא 15. בתדרים גבוהים העקומות הן מעריכיות עם חזקה משתנה בתחום שלפני הזרם היא 15. בתדרים נמוכים וזרמים גבוהים העקומות של השדה AC מתלכדות עם עקומת DC והחזקה שלהם שווה.



ציור מספר 15. בגרף מוצגים מדידות של E-I של YBCO כאשר הקו הראשון הוא שדה מגנטי DC וכל הגרפים האחרים הם בשדה משתנה, באמפליטודה של השדה 220 G rms ובתדרים שונים (2.3-103 Hz).

ציור מס' 15 מציג תוצאות של שדה חשמלי כתלות במתח בחוטי YBCO. בציור זה העקומה מס' 1 מתאימה לשדה מגנטי DC של 220 G הגרפים הנותרים מתאימים לשדות מגנטיים AC בתדרים 220 G rms ובאמפליטודה של

גם בחוט YBCO ישנם שני אזורים בתדרים נמוכים בגרפים של E-I: תלות מעריכית גם בחוט YBCO ישנה בזרמים קטנים מזרם קריטי וחזקה גבוה בזרמים גבוהים מזרם קריטי, עם חזקה קטנה בזרמים קטנים מזרם קריטי וחזקה גבוה במקצת מחוטי I_c =80 A, BSCCO כאשר בפרמטרים של חוק החזקה הם שונים במקצת מחוטי BSCCO, גדול יותר יחסית ל-BSCCO. המעבר החזקה הגבוהה יחסית מצביעה על $U_{\rm eff}$ גדול יותר יחסית ל-BSCCO המעבר בין האזורים חד יותר וקורה באופן מהיר יותר. בחוטי BSCOO המעבר מתרחש על פני A $^{-5}$ A

כפי שניתן לראות בציור מס' 16 ישנו הבדל מהותי בין שני החוטים. כאשר מפעילים כפי שניתן לראות בציור מס' 16 ישנו בחוט DC מאונך באמפליטודות שונות בחוט DC מאונך באמפליטודות שונות בחוט הדה הקריטי אם כי החזקה נשארת קבועה. לעומת זו ב-YBCO השפעתו של השדה

על הזרם הקריטי והן על DC חלשה יחסית והשוני בשדה משפיע מעט הן על הזרם הקריטי והן על DC . $U_{\rm eff}$ בגרף ניתן להבחין בהבדל החזקות בין שני החומרים הנובע מן הבדל ב החזקה. בחוט SBCCO בחוט YBCO החזקה היא 25~ וב-YBCO החזקה היא E-I לתלות חזקה. את תחום המעבר מהחלק של תלות חלשה בזרם של הגרף E-I לתלות חזקה.



DC ציור מספר 16. בגרף מוצג מתח המתקבל כתוצאה של הפעלת שדות מגנטיים DC באמפליטודות שדות מגנטיים YBCO

פרמטר נוסף המאפיין את מוליך-על הוא הזרם הקריטי שמקובל להתייחס אליו כזרם שרמטר נוסף המאפיין את מוליך-על הוא הזרם הקריטי שמקובל להתייחס אליו כזרם שבו הפלקסונים מתחילים להתנתק מבורות הפוטנציאל ($\frac{\mu V}{cm}$). בגרף מס' 17 ניתן לראות את השוני של זרם הקריטי בתדירויות ובאמפליטודות שונות של השדה המגנטי החיצוני.



DC ציור מספר 17. בגרף מוצגת תלות של הזרם הקריטי מנורמל (כל חוט נורמל בזרם קריטי YBCO) בהתאמה) כתלות בתדירות של השדה המגנטי החיצוני בשני החומרים (BSCCO) ו-BSCCO ובאמפליטודות שונות.

הזרם הקריטי יורד חזק מאוד כשמפעילים שדה מגנטי חילופי בתחום התדרים הנמוכים (עד בערך 10 Hz), הירידה זהה בשני החומרים. כאשר מגבירים את התדירות, הזרם הקריטי קטן ליניארית עם התדר. דבר נוסף המתקבל מהגרף שבכל האמפליטודות אנו מבחינים בכך שהזרם הקריטי ב-YBCO קטן מהר יותר מאשר ב-YBCO (עמ' 23). בגלל שפוטנציאל הלכידה ב-BSCCO קטן יותר מאשר ב-YBCO (עמ' 23).

כפי שניתן לראות בגרף מס' 18, צפיפות הזרם ב-YBCO גדולה בשני סדרי גודל מ-BSCCO. ניתן לראות שהשדה המגנטי לא משפיע על הזרם הקריטי ב-YBCO אבל כן מקטין אותו (עם עליית השדה) ב-BSCCO.



ציור מספר 18. מדידה של חוטי BSCCO ו-DC בשדה מגנטי DC באמפליטודות שונות.

לסיכום:

במדידת עקומות E-I של חוטי YBCO ו-YBCO נמצא שהתנהגות הינה מעריכית ~2 עם חזקה משתנה: בתדרים נמוכים בזרמים קטנים מזרם קריטי החזקה הינה 2. ובזרמים גדולים מזרם קריטי החזקה היא 15~ ב-BSCCO ו-YBCO. ב-YBCO ב-YBCO ב-22

החוטים שנמדדו מציגים שני אזורים בעקומות E-I אך המעבר בין האזור התלות החוטים שנמדדו מציגים שני אזורים בעקומות החוטים החלשה בזרם לבין תלות חזקה ב-YBCO. אנו מניחים החלשה בזרם לבין תלות חזקה בין החוטים (ראה עמ' 21).

מדידת (E(t

פרטי המדידות

E(t) בוצעו על אותם הדגמים ששמשו אותנו במדידות E-I. התוצאות מוצגות בצורה של גרפים התלויים בזמן של המתח המתפתח במוליך-על כאשר מופעל שדה מגנטי חיצוני במאונך לדגם. בחלק מהגרפים הוחלף ציר הזמן בפזה של השדה החיצוני לצורך תצוגה טובה של המתרחש בכל מחזור של השדה המגנטי המופעל.

. תלות של השדה החשמלי באמפליטודה של השדה המגנטי החיצוני.

. עלות של השדה החשמלי בתדירות של השדה המגנטי החיצוני.

. עלות של השדה החשמלי בזרם טראנספורט הזורם בדגם.

<u>השפעת הזרם DC על המתח החשמלי הרגעי.</u>

בציור מס' 19 ניתן לראות גרף של השדה החשמלי בחוט מוליך-על מסוג YBCO. הסיגנל הוא בעל תדירות כפולה, אותה ניתן להסביר ע"י כך שבכל מקסימום של השדה המגנטי החיצוני צריך להתקבל מקסימום איבוד אנרגיה. ניתן לחלק את המתרחש במוליך-על בזמן שמפעילים עליו שדה מגנטי חילופי וזרם ישר לשני מצבים: במצב הראשון כאשר הזרמים קטנים מן הזרם הקריטי, המתח המתקבל הוא לא בפזה עם הדידה המגנטי החיצוני. כאשר הזרם מן הזרם הקריטי, המתח המתקבל הוא לא בפזה של השדה המתח מו כאשר הזרמים קטנים מן הזרם הקריטי, המתח המתקבל הוא לא בפזה עם היראשון כאשר הזרמים קטנים מן הזרם הקריטי, המתח המתקבל הוא לא בפזה עם השדה המגנטי החיצוני. כאשר הזרם הקריטי, הכתף ממשיכה לגדול והיא לא זזה בפזה המתח מופיעה כתף. כאשר מעלים את הזרם, הכתף ממשיכה לגדול והיא לא זזה בפזה יחסית לשדה החיצוני. בזרם גדול מהזרם הקריטי הכתף צומחת לפיק והופכת לדומיננטית. המתח המתקבל הוא גם בתדירות כפולה יחסית לשדה החיצוני ובפזה עם השדה. צורתו היא סינוס "מעוות" עם פיקים חדים מאוד.





ציור מספר 19 . השדה החשמלי המתפתח במוליך-על מסוג YBCO כאשר מפעילים שדה מגנטי AC היצוני במאונך וזרם Ic בתדר F8.9 A). כאשר השדה הוא AC מגנטי 17 מיצוני במאונך וזרם 12 Hz בתדר 12 וזרמים משתנים מ

בגרף אנו יכולים להבחין שהכתף מופיעה רק בכל חצי מחזור של השדה החיצוני. כאשר השדה המגנטי בנקודות קיצון שלו, מתקבל פיק נוסף שבזרם גבוה הופך לדומיננטי. עובדה זו מצביעה על כך שהכתף היא תופעה הקשורה לפעולת גומלין בין השדה המגנטי החיצוני וזרם הטרנספורט ולא כתוצאה של מחסומי שפה או הגיאומטריה של החוט.

גרף מס' 20 מציג מדידת שדה חשמלי תלוי בזמן בחוט BSCCO. ישנם שני הבדלים בין החוטים: בחוט YBCO התזוזה בפזה לפני הופעת של הכתף היא קטנה מאוד ובחוטי BSCCO רואים בברור שכל שהזרם טראנספוט עולה כך השינוי בפזה בין השדה המגנטי החיצוני ובין השדה החשמלי המתפתח בדגם גדול יותר. חייבים לציין השדה המגנטי החיצוני ובין השדה החשמלי המתפתח בדגם גדול יותר. חייבים לציין שבזרמים קטנים (חצי זרם קריטי) בחוטי BSCCO השדה החשמלי בפזה עם השדה המגנטי. דבר נוסף העולה מן הגרפים של שני החומרים הוא שמשך "העלייה" של הכתף הרבה יותר מהיר ב-BSCCO מאשר ב-BSCCO. ב-BSCCO התחום הוא 5-8 אמפר ב-BSCCO זה לח-10 אמפר. העלייה של הכתף היא למעשה המעבר בין התופעות השונות לאיבוד אנרגיה. בחוטי BSCCO ישנם גם כן שני אזורים בגרף. בראשון מבחינים שקיימת תזוזה בפזה של הסיגנל המתקבל יחסית לשדה המגנטי החיצוני. באזור השני (בזרמים מעל זרם קריטי), בכל חצי מחזור של המתח מופיעה כתף. כאשר מעלים את הזרם, הכתף ממשיכה לגדול והיא לא זזה בפאזה יחסית לשדה החיצוני. המתח השדה החשמלי המתקבל הוא גם ב-BSCCO בקרוב סינוס עם תדירות כפולה.



ציור מספר 20. מדידה של שדה חשמלי תלוי בזמן המתפתח במוליך-על מסוג BSCCO בזמן (Ic=95.3 שמופעל שדה מגנטי חיצוני AC בניצב. העקומות השונות מתקבלות בזרמים שונים AC. תדר Hz בז תער גדר גרמים. (A)

אפשר לסכם את המדידות של התלות בזרם בכך שבתנאים של הפעלת שדה מגנטי ניצב וזרמי DC בגדלים שונים על חוטי מוליכי-על מסוג BSCCO ו-BSCCO בדגמים בדגמים מתפתח שדה חשמלי הנובע מתנועה של פלקסונים בדגם. נציין שהשדה החשמלי המתקבל בדגמים הוא בתדירות כפולה וחיובי. בזרמים נמוכים גל הדומה לסינוס בריבוע אך כאשר מגדילים את הזרם בכל חצי מחזור מופיעה כתף הגדלה עם הזרם ובזרמים גדולים (מעל זרם קריטי) הופכת דומיננטי. בזרמים קטנים ב-BSCCO מתקבלת הזזת בפזה וב-YBCO היא קטנה מאוד. בגרף מסי 21 מוצגת הפאזה כתלות . ניתן לראות שככל שאנו עולים בזרם אזי הפרש פאזה בין שדה החשמלי DC. בדגם לשדה מגנטי חיצוני גדל. נרחיב על כך בפרק הבא.



ציור מספר 21. בגרף ניתן לראות את השינוי בפאזה של השדה החשמלי המתפתח במוליך-על מסוג BSCCO. האמפליטודה של השדה המגנטי היא BSCCO.

<u>מדידות של (E(t) כתלוי באמפליטודה של השדה המגנטי</u>

כדי להבין טוב יותר את המתרחש במוליך-על בתנאי עבודה מדדנו את החוטים עם זרם AC קבוע ותדירות שדה קבועה והשינוי הוא רק באמפליטודה של השדה המגנטי DC בציור מס' 22 אנו רואים גרף טיפוסי שהתקבל במדידה של חוט BSCCO. ניתן להבחין שבכל האמפליטודות ישנם שני פיקים ובשדות גבוהים הפיק השני הוא הדומיננטי, הפיק השני נמצא בפאזה עם השדה המגנטי.



ציור מספר 22 - מדידה של שדה חשמלי תלוי בזמן בחוט BSCCO המתפתח עליו מופעל שדה מספר 22 - מדידה של שדה מגנטי חיצוני AC בגודל שדה מגנטי חיצוני 1.1 Ic בניצב בתדירות של קבוע של 1.1 Ic. האמפליטודה של השדה המגנטי משתנה מ80 עד 500 גאוס.

נמדדו גם חוטי YBCO באותם תנאים. גרף מס' 23 מציג את התוצאה המתקבלת. את רוב האינפורמציה שאנו יכולים לקבל מן הגרף של YBCO זה השוואה עם גרף של BSCCO (גרף מס' 22). ההשוואה היא איכותית בלבד בגלל שבאפמליטודות השונות של השדה המגנטי היחס של I/I_c משתנה חזק מאוד ולא ניתן להשוות את הגרפים הללו כמותית. כפי שאנו רואים, הגובה של סיגנל DC ב-YBCO גדול יותר בכל השדות שנמדדו, הופעתו של פיק שני מתרחשת בשדות גבוהים יותר מאשר בחוטי BSCCO, שני פיקים U-ה YBCO ואנו מניחים שבזמן שיש שני פיקים U-5 אנו מניחים שבזמן שיש שני פיקים עותר מאשר ב-YBCO ברגפים של (E(t) בגרף של E-I ישנו שינוי בשיפוע של הגרף-מעבר מהתנהגות מעריכית עם חזקה גבוהה.



AC ציור מספר 23. שדה חשמלי תלוי בזמן בחוט YBCO כשעליו מופעל שדה מגנטי חיצוני AC. ביור מספר 23. שדה חשמלי תלוי בחוט AC-1.1 I_c בניצב בתדירות של DC בגודל קבוע של 23. בדגם מעבירים זרם חשמלי 500 גאוס. אמפליטודה של השדה המגנטי משתנה מ 80 עד 500 גאוס.

<u>מדידות של E(t) כתלות בתדירות של השדה המגנטי</u>

אחת המסקנות החשובות שניתן להסיק מן המדידות שבוצעו במסגרת התזה היא ששדה מגנטי DC. מגנטי AC משפיע על חוטים מוליכי-על בצורה שונה מאשר שדה מגנטי AC החשיבות של מדידות של E(t) כתלות בזמן היא רבה מאוד כיוון שהשינוי בתדירות של השדה המגנטי משנה את האופן שבו החומר מוליך-על מגיב אליו. שני החומרים של השדה המגנטי משנה את האופן שבו החומר מוליך-על מגיב אליו. שני החומרים הנמדדים בעבודה מגיבים שונה לאותה תדירות של השדה מגנטי AC. התופעה של השדה בעבודה מגיבים שונה לאותה תדירות של השדה המגנטי מסגנטי משנה את האופן שבו החומר מוליך-על מגיב אליו. שני החומרים של השדה המגנטי משנה את האופן שבו החומר מוליך-על מגיב אליו. שני החומרים של השדה המגנטי משנה של השדה המגנטי את המידים בעבודה מגיבים שונה לאותה הדירות של השדה המגנטי חליפי שני פיקים בגרפים של בגובה שונה של שני החומרים לתדירות של השדה המגנטי חליפי מסגנטי זה לתגובה שונה של שני החומרים לתדירות של השדה המגנטי הליפי המופעל עליהם. בציור מס' 42 ניתן לראות את שני הפיקים, בחוט 400 המופעל ישמים.



ציור מספר 24. שדה חשמלי תלו בזמן בחוט BSCCO המתפתח בזמן שמופעל שדה מגנטי חיצוני בניצב לדגם עם אמפליטודה של 400 G ותדירות משתנה. בדגם מעבירים זרם חשמלי DC בגודל קבוע של A=1.7 Ic.

כאשר בתדירויות נמוכות הפיק הוא בפאזה עם השדה וכשהתדירות עולה אזי הפיק שבפאזה נעלם ומופיע פיק אשר לא בפאזה עם השדה. דבר נוסף העולה מהגרף זה שבפאזה נעלם ומופיע פיק אשר לא בפאזה עם השדה. דבר נוסף העולה מהגרף זה שבפיק בפאזה הגובה של סיגנל DC של המתח המתקבל הוא קבוע וכאשר עולים בתדר אזי מתח DC גם עולה.

בציור מס' 25 ניתן לראות גרף של מדידת מתח חשמלי של חוט YBCO בשדה מגנטי AC באמפליטודה של G 220, בגרף ניתן לראות שבזרמים קטנים הפיק הוא לא בפאזה עם השדה וככל שהזרם עולה הסיגנל זז בפאזה, עם הגדלת הזרם הפאזה גדלה, אבל שינוי בפאזה קטן מאוד. ב-A 92 הגרף הינו בעל שני פיקים בו זמנית. מעל זרם זה אנו רואים פיק שבפאזה עם השדה המגנטי החיצוני. הדבר המעניין שניתן לראות בגרף זה הוא גודל של סיגנל DC של כל עקומה אשר כל אחד מייצגת זרם שונה שזורם בחוט.



ציור מספר 25. מדידה של שדה חשמלי התלו בזמן בחוט YBCO. בזמן שמופעל שדה מגנטי חיצוני בניצב לדגם עם אמפליטודה של G G, תדירות 23 Hz וזרם משתנה.

אנו רואים שבזרמים נמוכים הגובה של הסיגנלים כמעט אותו הדבר אבל כאשר הזרם DC-גדל גם הרכיב ה-DC מתחיל לעלות. בנינו גרף (ציור מס' 26) של רכיב ה-DC בזרמים הללו והשווינו אותו עם הגרף E-I באותם תנאים.

בציור מס' 26 אנו רואים שרכיב ה-DC של השדה החשמלי התלוי בזמן משתנה עם הזרם דומה לזה הנצפה בעקומת E-I באותם תנאים. אנו יכולים להסיק מכך שהגובה של רכיב ה-DC בסיגנלים של השדה התלו בזמן נקבע ע"י התופעה השולטת על תנועת הפלקסונים (נרחיב על כך בפרק הבא).



ציור מספר 26. גרף של עקומת E-I בחוט YBCO שהשדה המופעל הוא באמפליטודה של 20 G ותדירות 23 Hz (קו אדום-עיגולים), הקו הכחול (ריבועים) מציג את רכיב ה-DC של מדידת השדה חשמלי תלוי בזמן באותם תנאים.

כפי שתארנו בפרק המבוא, הופעת התנגדות חשמלית במוליכי-על נובעת מתנועת פלקסונים בחומר. תנועה זו מתוארת, בדר"כ, ע"י מנגנון של "זחילת שטף". הפלקסונים לכודים בתוך בורות פוטנציאל ויוצאים משם בתהליכים של אקטיבציה תרמית. זרם חשמלי הזורם בדגם או שדה מגנטי המופעל עליו, גורמים כל אחד מהם להפעלת כוח לורנץ על הפלקסונים ולהקטנת פוטנציאל הלכידה האפקטיבי. בטמפרטורה קבועה ובמצב בו תהליכי אקטיבציה תרמית הם השולטים בתנועת הפלקסונים, הקטנה זו של פוטנציאל הלכידה גוררת אחריה עליה מעריכית במהירות הפלקסונים ובשדה החשמלי הנוצר בחומר. סיכום נרחב של תהליכי זחילת השטף ניתן למצוא במאמרי הסקירה^{3,25}.

לפיכך, ניסוי פשוט של מדידת עקומת זרם-מתח של מוליך העל מהווה שיקוף של פוטנציאל הלכידה האפקטיבי. בטמפרטורה קבועה ובהעדר שדה מגנטי, העלאת הזרם גורמת להגדלת כוח לורנץ וכתוצאה מכך להקטנת פוטנציאל הלכידה האפקטיבי ולעלייה מעריכית במתח החשמלי. ואכן, עקומות E-I של מוליכי-על בתנאים אלו, מתוארות היטב ע"י תלות מעריכית של המתח בזרם. הפעלת שדה מגנטי קבוע DC, מקטינה עוד את פוטנציאל הלכידה ועקומות הזרם-מתח בשדה קבוע נראות כמוזזות לזרמים נמוכים יותר לעומת העקומות המתקבלות ללא שדה.

בפרק הקודם, ראינו כי הפעלת שדה מגנטי חילופי AC, משנה את התמונה לחלוטין. ראינו כי הפעלת שדה משתנה גוררת הופעת מתח חשמלי בזרמים בהם לא הופיע מתח בשדה DC בעל אותה עוצמה. ראינו גם כי התמונה משתנה באופן איכותי וכי המתח תלוי כעת בזרם בתלות חלשה יחסית עם חזקה נמוכה. כן הראנו שהמתח תלוי חזק בתדירות השדה החילופי והוא עולה עם עליית התדר.

התופעות הנסיוניות המתוארות כאן אינן חדשות. עבודות קודמות במעבדה הראו כי שדה חילופי גורר אחריו תוספת מתח ^{14,21,24}DC. גם חוקרים אחרים בעולם הראו את התופעה ^{13,18}. בחלק מן העבודות נצפתה תלות חזקה בתדר, בחלק נצפתה התלות

דיוך

בתדר בתחומי שדות מסויים ובחלק כלל לא^{14,18,21}. חלק מן העבודות ניסו להסביר את התוצאות באמצעות מודלים של זחילת שטף, חלק אחר באמצעות הריסת מרכזי הלכידה כתוצאה מהפעלת שדה חילופי²⁵ (shaking) חלק באמצעות מודל גיאומטרי לחדירת השדה החילופי¹¹ ועבודות אחרות התייחסו להופעת המתח כתוצאה של התנגדות דינמית¹³. עד כה לא היתה אחידות דעים לגבי התוצאות הנסיוניות או לגבי ההסבר להן.

העבודה הנוכחית מאחדת לראשונה את כל התוצאות הנסיוניות ומראה כי כולן נכונות וכי כל אחת מהן מתקבלת בתחום אחר של הפרמטרים החיצוניים: זרם, אמפליטודה ותדירות. אנו מראים לראשונה כי הדינמיקה של הפלקסונים משתנה בתחומים שונים וכי קיים תחום מסוים בו הדינמיקה נשלטת ע"י הופעת התנגדות דינמית לעומת תחום אחר בו זחילת השטף היא הגורם הדומיננטי להופעת המתח. בתחום הראשון המתח המתקבל תלוי בזרם בתלות פרבולית ועם המעבר לאזור בו זחילת השטף מכתיבה את הדינמיקה, תלות זו הופכת להיות מעריכית עם חזקה גבוהה.

שיטה נסיונית חדשה שפותחה במעבדה מביאה תימוכין נוספים לתמונה הכללית המצטיירת ממדידות המתח DC. מדידות של המתח החשמלי הרגעי (E(t), מראות באופן ברור כיצד שינוי של כל אחד מהפרמטרים החיצוניים לעיל משנים בהדרגה את צורת האות. אנו מראים כי מתחת למשטח מסוים ציור מס' 27 המוגדר ע"י תדירות, אמפליטודה של השדה המגנטי וזרם DC הדינמיקה של הפלקסונים מתוארת היטב באמצעות מעבר של קווי שטף החוצים את הדגם מצד לצד בעוד שמעל היטב באמצעות מעבר של קווי שטף החוצים את הדגם מצד לצד בעוד שמעל המשטח זה הדינמיקה נשלטת ע"י זחילת שטף. באופן ניסיוני, באזור המוגדר ע"י המשטח הנ"ל, האות התלוי בזמן מראה הופעה של כתף נוספת (שני שיאים) כאשר כיוון חציית המשטח קובעת אילו משני השיאים יהפוך למרכזי ו"ישתלט" על האות כוון



ציור מספר 27. "דיאגרמת הפאזות" של דינמיקת הפלקסונים בחוט מסוג BSCCO, התהליך המתרחש מעל המשטח מתאר את האזור הנשלט ע"י ה-flux creep ומתחת למשטח זו הוא האזור בו הפלקסונים חוצים את הדגם.

התמונה הפיסיקלית המצטיירת בעקבות העבודה הנוכחית היא של שני תהליכים המתקיימים בכפיפה אחת כל העת כאשר בתחומים שונים תהליך אחד מתגבר על האחר והופך לדומיננטי ביצירת המתח החשמלי. כפי שאמרנו לעיל, פוטנציאל האקטיבציה התרמית U, הוא השולט בקצב זחילת השטף בטמפרטורה נתונה. בזרמים נמוכים ובשדות מגנטיים נמוכים U גדול מאד, קווי השטף לכודים חזק בבורות הפוטנציאל והתמונה היא כמעט סטטית. בתנאים אלו, השדה AC מכניס קווי שדה מעבר לאלה הממלאים את בורות הפוטנציאל ואלו עוברים את הדגם מצד לצד. כמות השטף נטו החוצה את הדגם היא התורמת ליצירת שדה החשמלי ממוצע סונה מאפס והיא נתונה ע"י הביטויים המתאימים שחוזה מודל ההתנגדות הדינמית. כמות זו מיוצגת ע"י המקבילית שבציור מס' 6, כאשר שטחה תלוי ליניארית באמפליטודת השדה ובחזקה שנייה בזרם. התדר קובע את סך כל הפעמים שהשטף חוצה את הדגם בשנייה כלומר תלות ליניארית בתדר.

עם עליית הזרם והשדה, פוטנציאל הלכידה האפקטיבי קטן וזחילת השטף מתחילה להיות משמעותית. במצב זה, יותר ויותר פלקסונים עוזבים את בורות הלכידה, מהירות הפלקסונים והמתח עולה באופן מעריכי עם הזרם כך שתהליכי זחילת השטף הופכים להיות דומיננטיים לעומת תהליכי ההתנגדות הדינמית. במצב זה, אנו השטף הופכים להיות דומיננטיים לעומת תהליכי החתנגדות הדינמית. במצב זה, אנו מראים כי עקומות המתח-זרם בנוכחות שדה AC חוזרות ומתלכדות עם אלו המתקבלות בשדה DC כך שהשפעת ההתנגדות הדינמית היא זניחה.

בהמשך הפרק נראה בפירוט את התאמת התוצאות הניסיוניות לכל אחד מהמודלים בתחומים השונים של זרם, אמפליטודה ותדירות.

<u>E-I ניתוח עקומות</u>

כאמור, עם הפעלת שדה מגנטי חיצוני DC בעקומות E-I אנו מצפים לקבל תלות מעריכית של המתח בזרם²⁶ כאשר הזרם הקריטי קטן והגרפים זזים על ציר הזרם לזרמים נמוכים יותר²¹. הפעלת שדה מגנטי AC גוררת שינוי איכותי של התמונה והופעת אזור עם חזקה נמוכה בעקומות E-I. אזור זה מתחיל בזרמים קטנים ומתמשך עד לקרבת הזרם הקריטי. בנקודה זו העקומה משנה את השיפוע שלה וחוזרת להתנהג לפי חוק החזקה.

: E-I אנו סבורים שיש שני תחומים בעקומות

זרמים נמוכים, *I < I*

:⁹⁻¹² את המתרחש נסביר ע"י מודל ההתנגדות הדינאמית

כאשר בנוסף לשדה מגנטי חיצוני (מאונך לדגם) זורם גם זרם DC צורת ההתפלגות של השדה המגנטי (בזמן של מחזור אחד) בעלייה של השדה המגנטי שונה בסימטריה (יחסית לאמצע הדגם) מהתפלגות של השדה בירידה של השדה המגנטי. עקב חוסר הסימטריה זה, בכל מחזור קיימים פלקסונים אשר נכנסים מצדו אחד של הדגם ויוצאים מצידו השני. הדבר גורם להופעתו של שדה חשמלי בעל ממוצע בזמן השונה מאפס.

נוצר שדה חשמלי.

לפי Brandt¹⁷ (HTS) הנוסחה (HTS¹⁷) הנוסחה של מודל "ההתנגדות הדינאמית" ל-HTS) הנוסחה שמתארת את המתח החשמלי בחוט מוליך-על בזמן שמופעל עליו שדה מגנטי AC+DC:

(5.1)

$$E = \frac{I}{I_c} \frac{2w\omega}{\pi} \left(B - B^* \right)$$

$$B^* = 2 \left(1 - \frac{I}{I_c} \right) B_p$$

כאשר B_p הוא שדה החדירה, ω תדירות השדה המגנטי, w רוחב הדגם, B_p הזרם הקריטי. תנאי ההתחלה של המודל הם $B_0 + B_1 \sin \omega t$ כאשר $B_1 = B_0$. לפי המודל הקריטי. תנאי ההתחלה של המודל הם $B_0 + B_1 \sin \omega t$ כאשר התלות באמפליטודה של השדה ובתדר היא ליניארית. חשוב לציין כי במקרה שלנו אין התלות באמפליטודה של השדה ובתדר היא ליניארית. חשוב לציין כי במקרה שלנו אין התלות באמפליטודה של השדה ובתדר היא ליניארית. חשוב לציין כי במקרה שלנו אין התלות באמפליטודה של השדה ובתדר היא ליניארית. חשוב לציין כי במקרה שלנו אין התלות באמפליטודה של השדה ובתדר היא ליניארית. חשוב לציין כי במקרה שלנו אין הוספת שדה DC, כלומר $B_0 = 0$ ובמקרים רבים בניסיונות שלנו B הוא מסדר גודל של חספת שדה DC, כלומר $B_0 = 0$ ובמקרים רבים בניסיונות שלנו מחספר גודל השדה החשמלי בתדירות מהמדידות, ובגרף מספר 29 מוצגת התלות של השדה החשמלי בשדה המגנטי החיצוני. כפי שניתן לראות, התלות בתדר ובאמפליטודה של השדה המגנטי המתקבל במדידות היא ליניארית, בהתאמה למודל.



ציור מספר 28. בגרף מוצגת תלות של שדה חשמלי בתדירות של השדה המגנטי החיצוני בשני סוגי החוטים אשר נמדדו בעבודה.



ציור מספר 29. בגרף מתוארת תלות של השדה החשמלי באמפליטודה של השדה המגנטי. תדירות השדה הינה 100 A הזורם בדגם הוא 100 A.

כדי להבין את התלות של השדה החשמלי בזרם, נציג את משוואה 5.1 באופן הבא:

(5.2)
$$E = \frac{8wfB_p}{I_c^2} \left[I^2 + \frac{(B - 2B_p)I_c}{2B_p} I \right]$$

כפי שעולה מהנוסחה המודל מנבא איבר עם תלות ריבועית בזרם (המודל לוקח בחשבון את השינוי של שדה החדירה עם הזרם (DC). נציין כי בניסויים אליהם החשבון את השינוי של שדה החדירה עם הזרם DC). נציין כי בניסויים אליהם התייחסה העבודה של Brandt, הופעל גם שדה חיצוני גדול DC כך שהתקיים התייחסה במקרה זה האיבר הדומיננטי במשוואה 5.2 הוא האיבר הליניארי, ואכן התוצאות שם נראות לינאריות.

בציור מס' 30 מוצגים האזורים בעקומות E-I בזרמים נמוכים. זוהי הגדלה של ציור מס' 12 (עמוד מס' 27). ניתן לראות בבירור כי העקומות אינן לינאריות וכי הן מכילות איבר הנראה כריבועי וככל שעולים בתדירות המקדם של החזקה גדל. התאמת התוצאות למשוואה 5.2 מוצגת בגרף כקו מלא העובר בין הנקודות הניסיוניות. ניתן לראות כי מתקבלת התאמה טובה מאד. בגרף מס' 31 ניתן לראות את המקדם של ריבוע הזרם שהתקבל מההתאמות כשהוא מוצג כתלות בתדר. הקו הכחול מציג את התוצאות עבור YBCO והאדום עבור BSCCO. בגרף מס' 32 מוצגת התלות של השדה החדירה של BSCCO בתדר. התוצאות המוצגים בגרף (קו כחול - ריבועים) נמדדו בטכניקה של מגנטו-אופטיקה, בלי זרם DC ובטמפרטורה של 70 K. התוצאות נלקחו מתוך עבודת התיזה של רויטברג²¹. העקומה השנייה (קו אדום - עיגולים) מציגה את גודל של שדה החדירה כפי שמתקבל מהמשוואה (מס' 5.1) של המודל "ההתנגדות הדינאמית". כפי שניתן לראות בגרף, השדה החדירה עולה עם התדר חזק מאוד בתדרים נמוכים ומגיע לרוויה בתדרים גבוהים יותר. למרות השוני בין מערכות המדידה וטמפרטורה אנו רואים שבאופן איכותי ההתנהגות דומה בשני העקומות. כלומר ששדה החדירה עולה עם התדר. חשוב לציין שבגלל שחוטי YBCO הם חדשים עדיין אין תוצאות ניסיוניות עבור התלות של שדה החדירה בתדר. בגלל חוסר המידע לגבי חוטי YBCO והמידע האיכותי בלבד הקיים לגבי חוטי אפשר להסביר באופן כמותי את ההתנהגות של מקדם הזרם בריבוע במודל "ההתנגדות



שזרם קריטי ב- YBCO קטן יותר מ-BSCCO אנו מקבלים ערכים גדולים יותר של המקדם ב-YBCO (רוחב הדגם, w, דומה בשני החוטים).

גרף 30. הגדלה של ציור מס' 12 בזרמים נמוכים. עקומות E-I במספר תדרים עבור זרמים קטנים מהזרם הקריטי. הקווים המחברים בין הנקודות הניסוייות מתארים התאמה למשוואה 5.2. האמפליטודה של השדה המגנטי הינה G .



- גרף אהתקדם של I^2 שהתקבל מהתאמה למשוואה 5.2 בחוט YBCO (קו כחול מרוסק S1 המקדם של I^2 (קו כחול מרוסק - ריבועים) ובחוט BSCCO (קו אדום רציף - עיגולים)

בציור מסי 33 מוצג המקדם הליניארי של הזרם בנוסחה 5.2. מקדם זה פרופורציונאלי להפרש בין גודל השדה החיצוני וגודל שדה החדירה. כל עוד שדה החדירה קטן מהשדה החיצוני, המקדם חיובי וכששדה החדירה גדול מהשדה המגנטי החיצוני הוא הופך להיות שלילי. בתדרים נמוכים המקדם הוא חיובי (שדה החדירה קטן מהשדה המגנטי החיצוני) ובגלל זה ההתנהגות בסקלת log-log נראית כמעריכית עם חזקה המגנטי החיצוני) ובגלל זה ההתנהגות בסקלת עדה החדירה גדול מהשדה המגנטי 2~, כשאנו עולים בתדר אזי המקדם הוא שלילי (שדה החדירה גדול מהשדה המגנטי אנו מעריכים ששדה החדירה תמיד קטן מהשדה המגנטי החיצוני ובגלל זה אנו מקבלים אנו מעריכים שדה החדירה תמיד קטן מהשדה המגנטי החיצוני ובגלל זה אנו מקבלים את המקדם תמיד חיובי גרף מסי 33.



(ריבועים) אול מספר 32. התלות של שדה החדירה B_p בתדר, בחוט BSCCO. קו כחול (ריבועים) ציור מספר 32. התלות של מגנטו - אופטיקה 21 , קו אדום (עיגולים) מתקבל ממודל "ההתנגדות הדינאמית", משוואה מס' 5.1



ציור מספר 33. המקדמם של האבר הליניארי במודל "ההתנגדות הדינאמית", משוואה מס' . 5.2, כפונקציה של התדר.

בתחום הזרמים הנמוכים, מודל "ההתנגדות הדינאמית" מתאר את התוצאות בצורה טובה בכל תחום התדרים. המודל מניח שדה החשמלי שווה לאפס באמפליטודות קטנות משדה החדירה. במדידות שלנו, בתחום זה אנו מקבלים שדה חשמלי אינו אפס. התוצאות שלנו מצבעיות על כך שבתחום זה עדיין ישנה תנועה של הפלקסונים מצדו האחד של הדגם לצדו השני. נדרשת הרכבה של המודל "ההתנגדות הדינאמית" כדי לכלול בו גם את התלות בתדר של B_p ואת הופעת המתח באמפליטודות קטנות מ- B_p .

I ≥ *I*_c ניתוח העקומות בזרמים גבוהים

בעמוד 28 הראנו שבתדרים נמוכים, כשהזרם מגיע עד לסביבת הזרם הקריטי ועובר 28 העמוד E-I מתלכדות עם העקומה המתקבלת בשדה מגנטי DC. כלומר, אותו, העקומות E-I מתלכדות עם העקומה של זחילת שטף. בגרף 34 ניתן לראות ההתנהגות היא מעריכית ומתוארת ע"י מודלים של זחילת שטף. בגרף 34 ניתן לראות את עקומות E-I בזרמים גדולים כשהן מוצגות בסקלה לוגריתמית. ניתן בבירור לראות כי התלות היא מעריכית והחזקה המתקבלת היא בסביבות 25 והיא יורדת מעט עם

יותר (~15) מתקבלות עבור BSCCO.

ברור כי גם בתחום I_c ממשיכים פלקסונים לחצות את הדגם מצד לצד וההתנגדות הדינמית ממשיכה לתרום לשדה החשמלי. אולם, מכיוון שתהליך זה תורם תרומה יחסית קטנה למתח, הרי שמרגע שמתחיל להתפתח מתח התלוי בזרם עם חזקה גבוהה, תרומתו הופכת להיות דומיננטית ומכסה על המתח המתפתח עקב חציה של הדגם (תלות פרבולית).



גרף 34. החלק של עקומות E-I בזרמים גדולים בסקאלה לוגריתמית. מוליך-על מסוג DC, DC, אמפליטודה של השדה המגנטי הינה BSCCO. כל התדרים מתלכדים עם עקומת n=15.6 עם n=15.6.

<u>E(t) תוצאות המדידות</u>

מדידות של השדה החשמלי התלוי בזמן תומכות בהסבר שהצענו קודם. סיגנל השדה החשמלי הרגעי מראה התנהגות שונה בזרמים נמוכים מזרם קריטי ובזרמים הגבוהים ממנו. בפועל, מופיע המעבר בין התחומים ע"י "כתף" שמופיעה על גבי האות. "כתף" זו הופכת לדומיננטית עם עליית האמפליטודה או הזרם, או עם הקטנת התדר. בגרפים המתארים את השדה התלוי בזמן, אנו מבחינים שהסיגנל המתקבל הוא בתדירות DC. כאשר הזרם קטן מזרם קריטי אנו מקבלים סיגנל שצורתו היא "סינוס בריבוע" וככל שעולה הזרם מתקבלת הזזת פאזה יחסית לשדה המגנטי החיצוני. בזמן שהזרם מגיע קרוב לערכו הקריטי אנו מבחינים שבכל חצי מחזור של המתח החשמלי מתחילה להופיע "כתף" אשר גדלה עם עלייתו של הזרם. בזרמים מעל הזרם הקריטי, הכתף הופכת לפיק דומיננטי הנמצא בפאזה עם השדה המגנטי החיצוני. הפיק שהיה לפני הופעת "הכתף" נבלע בתוך הסיגנל החדש.

אנו מיחסים את הופעת "הכתף" בסיגנלים הנמדדים למעבר בין שני התהליכים השונים השולטים בדינמיקה של הפלקסונים שתיארנו לעיל. בזרמים קטנים, השדה המגנטי AC מאפשר לפלקסונים להיכנס מצדו אחד של הדגם ולצאת מצדו השני¹⁷ וככל שגדל הזרם כך יותר ויותר פלקסונים יכולים לעבור את הדגם כולו. בזרמים גבוהים, מנגנון זחילת השטף הופך משמעותי יותר ויותר עד שהוא שולט לחלוטין בצורת האות. הפיק שהוא בפאזה עם השדה החיצוני מיוחס גם הוא למנגנון זחילת השטף, שכן מקסימום מהירות הפלקסונים מתקבל במינימום פוטנציאל לכידה, דהיינו מקסימום שדה חיצוני (כוח לורנץ מקסימלי)²⁶.

את הזזת הפאזה בזרמים נמוכים אנו מיחסים לכך שקיימת תלות חזקה בזרם במודל זה (המודל הדינאמי-ראה עמוד 9). בזמן שהזרם גדל, המקסימום של השדה החשמלי שמתפתח בדגם זז יחסית אמצע הדגם. אנו מודדים את השדה החשמלי בדיוק באמצע של הדגם ולכן אנו מבחינים בהזזה בפאזה (גרף 35). במלים אחרות, כאשר הזרם עולה ויותר פלקסונים עוברים את הדגם כולו, פרופיל השדה המגנטי מאבד את הסימטריה יחסית למרכז הדגם. חוטי מדידות המתח נשארים כל הזמן במקום, ועקב כך אנו מקבלים הזזה של מקסימום השדה החשמלי בגרף.

כאשר הזרם גדול מספיק והשדה החשמלי בדגם מתקבל בגלל flux creep, אין פרופיל Bean בדגם ובגלל זה אין תזוזה בפאזה בסיגנלים של השדה החשמלי התלוי בזמן.



ציור מספר 35. ציור סכמאטי של פרופיל השדה המגנטי בחוט כאשר מזרימים זרם DC ביחס לנקודות מגעי המתח.

מדידה של השדה החשמלי התלוי בזמן מציגה את המתרחש בחוט בכל מחזור וניתן להבחין בפרטים ובשינויים קטנים המתרחשים במשך מחזור השדה המגנטי. לעומת זאת, העקומות E-I מציגות תמונה כוללת יותר של המתרחש בחוט. שתיהן מצביעות על העובדה שיש שתי מנגנונים שונים הגורמים למתח חשמלי במוליך-על. כפי שכבר על העובדה שיש שתי מנגנונים שונים הגורמים למתח חשמלי במוליך-על. כפי שכבר הוסבר (עמוד 41), שינוי הגובה של רכיב ה-DC בסיגנלים של (t) לפי זרם, מתלכד הוסבר (עמוד 41), שינוי הגובה של רכיב ה-DC בסיגנלים של (t) לפי זרם, מתלכד הוסבר (עמוד 41), שינוי הגובה של הכיב ה-DC בסיגנלים של E-I הוא החלק של במדויק בעקומת E-I באותם תנאים. החלק הליניארי בעקומות E-I הוא החלק של הסיגנלים שאינם בפאזה עם השדה המגנטי והחלק המעריכי בעקומות E-I הוא הסיגנל שבפאזה עם השדה המגנטי.

ה"כתף" היא האזור בו שתי התופעות הללו מתקיימות יחד ותורמות תרומה דומה לשדה החשמלי. אפשר לקרוא לאזורים אלו "פאזות" בגלל שבכל פאזה מנגנון אחר של תנועת הפלקסונים הוא הדומיננטי ביצירת שדה חשמלי (איבוד אנרגיה). בגרף מס' 27 מוצגת "דיאגרמת הפאזות" של המערכת שמדדנו. המשטח המוצג בגרף, מתאר את הגבול שמפריד בין שני התופעות: מתחת למשטח, השדה החשמלי הוא תוצאה של המודל "ההתנגדות דינאמית" ומעל המשטח ע"י תהליכי flux creep. כפי שניתן לראות בגרף מס' 27 ככל שהתדירות גדלה המעבר לפיק השני (בפאזה עם השדה המגנטי) מתרחש בשדות גדולים יותר. כאשר שדה מגנטי הוא DC אזי המערכת תציג רק פיק אחד בפאזה עם השדה, כשהשדה המגנטי הוא AC נוצר מתח נוסף אשר תציג רק פיק אחד בפאזה עם השדה, כשהשדה המגנטי הוא AC נוצר מתח נוסף אשר דוחק את הופעתו של flux creep. כל עוד התדירות נמוכה, בכל האמפליטודות ישנו רק פיק בפאזה אבל כאשר אנו מעלים את התדירות אזי אנו מתרחקים מהמצב הזה וכך מגדילים את הופעתו של המעלים את התדירות נמוכה, בכל האמפליטודות ישנו הק פיק בפאזה אבל כאשר אנו מעלים את התדירות אזי אנו מתרחקים מהמצב הזה וכך מגדילים את התחום בו מופיע פיק שאינו בפאזה עם השדה המגנטי ואשר מסמל את שדה החשמלי הנוצר ע"י שדה מגנטי בפאזה עם השדה המגנטי ואשר מסמל את בזמן מסמן את התחום בו מופיע פיק שאינו בפאזה עם השדה המגנטי ואשר מסמל את שדה החשמלי הנוצר ע"י שדה מגנטי AC. הפיק השני בגרפים של שדה חשמלי התלוי בזמן מסמן את האמפליטודה, אנו מקטינים את פוטנציאל הלכידה ומגדילים את תרומתו של מנגנון זחילת השטף לשדה החשמלי.

אנליזה של גרפים התלויים בזמן בעזרת טרנספורמציית פורייה.

אחת הטכניקות המקובלות לאנליזה של מדידות בזמן היא השימוש בטרנספורמציית פורייה. אנו מעבירים את כל הגרפים מתחום הזמן לתחום התדר. בעבודה זו הפעלנו שדה מגנטי AC והמתח שהתקבל בחוט מוליך-על נראה בקירוב כסינוס בערך מוחלט (בתדירות כפולה). כשנעביר סיגנל כזה לתחום התדר נצפה לקבל הרמוניות זוגיות והרמוניה אפס שמבטאת את רמת מתח ה-DC של הסיגנל.

את התוצאות של טרנספורמציית פורייה ניתן לראות בגרפים מס' 36-37. בגרף מס' 36, מוצגות 3 עקומות אשר כל אחת מייצגת אמפליטודה של שדה מגנטי חיצוני בחוט 36, מוצגות 3 עקומות אשר כל אחת מייצגת אמפליטודה של שדה מגנטי חיצוני בחוט מסוג BSCCO. העקומה שנמדדה ב- 80 מייצגת את האזור בדינמיקת הפלקסונים בו ההתנגדות הדינמית היא המקור העיקרי לשדה החשמלי והיא היוצרת אות שאינו בו ההתנגדות הדינמית היא המקור העיקרי לשדה החשמלי והיא היוצרת אות שאינו בו ההתנגדות הדינמית היא המקור העיקרי לשדה החשמלי והיא היוצרת אות שאינו בו ההתנגדות הדינמית היא המקור העיקרי לשדה החשמלי והיא היוצרת אות שאינו בו ההתנגדות הדינמית היא המקור העיקרי לשדה החשמלי והיא היוצרת אות שאינו בי המנגדות הדינמית היא המקור העיקרי לשדה החשמלי והיא היוצרת אות שאינו בי המתקבל הוא בפאזה עם השדה המגנטי החיצוני ואילו ב- 20 00 אנו נמצאים בתחום ביניים של המעבר בין שתי התופעות ובו שני המנגנונים תורמים תרומה משמעותית לשדה החשמלי. בעקומה הראשונה בגרף 36 (כתום, 80 מ) ניתן לראות שהסיגנל של השדה החשמלי מורכב מהרמוניה שנייה בלבד. בעקומה שלישית (ירוק, 500 מ) אנו

לראות 220 G (220 G רואים מעבר בין שני התופעות השונות. גם כאן ניתן לראות את ההרמוניות הזוגיות שונה מעקומה הירוקה וצהובה כי הגל המקורי מציג בו זמנית את שני התופעות.



ציור מספר 36. בגרף מוצגות ההרמוניות המתקבלות כתוצאה של טרנספורמציית פורייה של התגובה לשדה 36 G, 220 G, 500 G. בשלוש אמפליטודות שונות: BSCCO קרחוט AC בחוט התגובה לשדה, הקו הירוק הוא המצב שבו הפיק בפאזה עם השדה, הקו הירוק הוא המצב שבו הפיק בפאזה עם השדה והקו האדום הוא המעבר בין שני תופעות.

בגרף מס' 37 מוצגות התוצאות של טרנספורמציית פורייה בחוט YBCO. כאשר גם כאן אנו רואים שבאמפליטודה של 80 G ההרמוניה שניה בלבד. באמפליטודה של 500 G אנו רואים כמה הרמוניות זוגיות. באמפליטודה של 500 G ניתן לראות את ההרמוניות זוגיות שהרכב של הם שונה מהרכב של מעקומות האחרות כי היא מציגה בו זמנית את שני התופעות.



ציור מספר 37. בגרף מוצגות ההרמוניות המתקבלות כתוצאה של טרנספורמציית פורייה של הספר 37. בגרף מוצגות ההרמוניות המתקבלות כתוצאה של טרנספורמציית פורייה של התגובה לשדה AC בחוט YBCO, 200 G, 200 G, הקו הירוק הוא המצב שבו הפיק בפאזה עם הכתום הוא המצב שבו הוא המעבר בין שני תופעות.

מסקנה החשובה ביותר שמתקבלת מהניתוח הגרפים ע"י FFT היא שישנם שני תחומים בגרפים של השדה התלוי בזמן: אזור ראשון מורכב מהרמוניה שנייה בלבד וזה מצביע על כך שאיבוד האנרגיה במוליך על תלוי רק באמפליטודה של השדה המגנטי ובתדירות. ואזור השני אשר מורכב מהרמוניות מסדרים גבוהים יותר מצביע על אי-לינאריות גבוהה יותר בתהליך יצירת השדה החשמלי. מקור ברור לאי-על אי-לינאריות כזו הוא תהליך flux creep, שם ראינו תלות עם חזקה גבוהה של השדה בזרם ובשדה.

$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10-\delta}$ ו $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ דוטי

בעבודה זו נמדדו שני סוגים של מוליכי-על 123 YBCO ו-BSCCO 2223. חומרים אלה נבדלים בתכונת האיזוטרופיה שלהם (ראה עמוד 21). האניזוטרופיה ב-BSCCO יותר גדולה יחסית ל-YBCO. החוטים אשר נמדדו בעבודה שונים לא רק בסוג של מוליך-על אלא גם בגיאומטריה של החוט. החוט הראשון מורכב משכבה דקה (מיקרון) של חומר מוליך-על סופות עטופות עטופות מייצבות וכל השכבות עטופות בשכבת כסף. לעומת זאת חוט BSCOO הינו חוט המורכב מ-55 פילמנטים של חומר מוליך-על כאשר כל הפילמנטים נמצאים במטריצת כסף. החומר מוליך-על ממוקם בחוטים כך שציר c הוא מאונך לצד הרחב של החוט.

כפי שכבר הזכרנו (עמוד 21) האניזוטרופיה בחומרים שונה וזה משפיע על צורתו של הפלקסון ועל האופי הלכידה שלו בחומר. ב-YBCO הפלקסון הלכוד זקוק ליותר אנרגיה בשביל לצאת מן הבור הפוטנציאל והשחרור הוא של פלקסון שלם, כלומר אנרגיה בשביל לצאת מן הבור הפוטנציאל והשחרור הוא של פלקסון שלם, כלומר אנרגיה בשביל לצאת מן הבור הפוטנציאל והשחרור הוא של פלקסון שלם, כלומר לכל הפנקייקים המרכיבים אותו. לעומת זאת ב-BSCCO פוטנציאל הלכידה קטן לכל הפנקייקים המרכיבים אותו. לעומת זאת ב-BSCCO והשחרור הוא של פלקסון שלם, כלומר זיתר והפלקסון משתחרר בהדרגתיות. הוכחה לכך אנו רואים במדידות שלנו. בגרפים יותר והפלקסון משתחרר בהדרגתיות. הוכחה לכך אנו רואים במדידות שלנו. בגרפים 12,15 מוצגים עקומות E-I בשני החוטים. ניתן לראות שהמעבר בין שתי התופעות ב-YBCO פוטנציאל הלכידה וכשמגדילים את הזרם נמוך, המתח המופיע לא תלוי בגודל של פוטנציאל הלכידה וכשמגדילים את הזרם ומתחיל ה-Hux מפוטנציאל הלכידה וכשמגדילים את הזרם ומתחיל ה-glux המתח בו תלוי מתבצע באופן מעריכי ב-U. מכיוון שב-YBCO נפנודה של המעבר בין התופעות אנו רואים מתבצע באופן חד יותר אזי גם המעבר ביו התופעות הוא "חד" יותר ומתרחש בתחום הבציאל מעריכי ב-U. מכיוון שב-BSCO נפנודה של המעבר בין התופעות אנו רואים מתבצע באופן חד יותר אזי גם המעבר ביו התופעות הוא "חד" יותר ומתרחש בתחום המבצע באופן חד יותר אזי גם המעבר ביו התופעות הוא הביקית יותר ומתרחש בתחום זרמים קטן יותר לעומת BSCCO בדיוק בנקודה של המעבר בין התופעות אנו רואים ותמים קטן יותר לעומת BSCCO מעבר ביו התופעות הוא ההבדל באנאיזוטרופיה שבין החוטים כי ב-BSCO המעבר בין התופעות אנו רואים ומתפרס על פני תחום זרמים גדול יותר.

בזרמים קטנים מזרם קריטי כפי שניתן לראות בגרף מס' 28 ישנו הבדל בשדה החשמלי בין החוטים. אנו מעריכים שהדבר נובע מההבדל בין הגדלים של שדה החדירה. לפי מודל "ההתנגדות הדינאמית", ככל ששדה החדירה קטן יותר כך השדה

. בגלל שחוטי YBCO קטן יותר מ-BSCCO בגלל בגלל אחוטי

לסיכום: ניתוח התוצאות הניסיוניות שהתקבלו במדידות השדה החשמלי DC והשדה החשמלי הרגעי בשני סוגי חוטים מוליכי-על מצביע על כך שקיימים שני סוגי תהליכים השולטים בדינמיקת הפלקסונים וגורמים להופעת מתח חשמלי. התוצאות נותחו בעזרת מודל ההתנגדות הדינאמית ומודל זחילת השטף והתקבלה התאמה טובה לתיאור המודלים בתחומי זרם שונים. בזרמים נמוכים התהליך הדומיננטי הוא תהליך חציית הדגם מצד לצד של הפלקסונים ובזרמים גבוהים זחילת השטף היא הגורם העיקרי ליצירת שדה. לראשונה נמדדו גם חוטי YBCO שם מצאנו מעבר חד יותר בין התחומים ושדה חשמלי גבוה יותר בתחום ההתנגדות הדינמית.

6. סיכום

נהוג לחשוב שהתנהגות של חוט מוליך-על שמופעל עליו שדה מגנטי AC חיצוני דומה להתנהגות בנוכחות שדה DC, כלומר התלות של השדה החשמלי בזרם מתוארת ע"י חוק החזקה ושבזרמים הקטנים מזרם קריטי ההתנגדות שווה לאפס או זניחה. בעבודה זאת אנו מראים באופן ברור שהתמונה מורכבת יותר וכי שדה מגנטי AC גורם להופעת שדה חשמלי באזורים בהם נחשב מוליך העל לחסר התנגדות. על פי מדידות וניתוח אנליטי בעזרת מודלים פיזיקאליים קיימים, הראנו כי שני מנגנונים פיסיקליים שונים אחראים ליצירת השדה החשמלי בתחומים שונים של אמפליטודה ותדר השדה המגנטי ובתחומי זרם שונים.

בעבודה זו מדדנו את השדה החשמלי כתלות בזמן (השדה החשמלי AC הרגעי). בנוסף לכך אפיינו את החוטים ע"י מדידת עקומות E-I בה נמדד השדה החשמלי הממלי בנוסף לכך אפיינו את החוטים ע"י מדידת עקומות JDC בה נמדד השדה החשמלי הממוצע DC. במדידות של השדה החשמלי התלוי בזמן מצאנו שני מנגנונים: בראשון, בתחום הזרמים נמוכים מ- I_c , השדה החשמלי המתקבל במוליך-על אינו בפאזה עם השדה השדה המגנטי, ושני, בתחום הזרמים גבוהים מ- I_c , השדה החשמלי בפאזה עם השדה המגנטי. גם במוכים גבוהים גבוהים מ- I_c מצאנו שני מנגנטי. גם במדידות של במזימים גבוהים מ- I_c , מדידה החשמלי במזיקה המגנטי. גם במדידות של I_c מצאנו שבזרמים שונים ההתנהגות בגרף משתנה מחזקה נמוכה, בתחום הזרמים קטנים מ- I_c , לחזקה גבוהה, בזרמים מעל .

מדידת המתח החשמלי התלוי בזמן מאפשרת לנו לעקוב אחרי המתרחש בחומר בצורה ישירה ולא לקבל סכימה על כל השדות המתפתחים במוליך-על כמו לדוגמה במדידות אפייני E-I. בנוסף, כיוון שהסיגנל תלוי בזמן אנו יכולים להשתמש בטרנספורמציית פורייה המאפשרת לנו לחלק את הסיגנל לרכיבים יסודיים המרכיבים אותו על מנת לנתח את התוצאות בצורה יסודית. לצורך מדידת (t) בנינו מערכת מדידה המאפשרת לאפיין את הפסדי האנרגיה המתפתחים במוליך-על כתלות בזמן. בעבודה הצגנו מדידות של השדה החשמלי התלוי בזמן המתפתח בחוטי מוליכי-על כתגובה לשדה מגנטי AC. ערכנו השוואה של התגובה החשמלית התלויה בזמן שבשני סוגי החוטים מוליכי-על (BSCCO ו-BSCCO) והשוונו בין הרכיבים היסודיים אשר מרכיבים את הגלים.

בעבודה זו מדדנו לראשונה חוט מוליך-על המבוסס על YBCO, אשר מהווה את הדור המדידות E-I וגם ע"י המדידות של חוטי מוליכי-על של ASC. החוט אופיין ע"י עקומות של חוטי מוליכי-על של של השדה החשמלי התלוי בזמן.

אנו מסבירים את המתרחש במוליך-על בזרמים הקטנים מ-I_c (סיגנל לא בפאזה ב-E-I ע"י מודל "ההתנגדות הדינאמית" אשר מניח שהשדה החשמלי המתקבל (E(t) של E-I ע"י מודל "ההתנגדות הדינאמית" אשר מניח שהשדה החשמלי המתקבל במוליך-על בגלל שדה מגנטי AC נובע מתנועה של פלקסונים לאורך הדגם. במהלך מחזור שדה אחד נכנסים הפלקסונים מצדו האחד של הדגם ויוצאים מצידו השני. תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך שהמתח החשמלי הממוצע איננו אפס. בזרמים גדולים מסיור שדה אחד נכנסים הפלקסונים מצדו האחד של הדגם ויוצאים מצידו השני. תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך שהמתח החשמלי הממוצע איננו אפס. בזרמים גדולים מ- I_c מסיור שדה אחד נכנסים הפלקסונים מצדו האחד של הדגם ויוצאים מצידו השני. תנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך שהמתח החשמלי הממוצע הנו אפס. בזרמים גדולים מ- I_c הנועה חד-כיוונית זו גורמת לכך שהמתח החשמלי הממוצע הינם היא מעננו אפס. בזרמים גדולים היא מרכיות הפלקסונים היא מרחשות הדיה. מעל זרם קריטי שתי התופעות מתרחשות יחד, אבל המתח המתקבל בגלל flux creep גדול בהרבה כיוון שהתלות שלו בזרם היא מעריכית (לעומת חזקה שניה במקרה של מודל "ההתנגדות הדינאמית").

חיזוק של הטענה שישנן שתי תופעות, "ההתנגדות הדינאמית" ו-flux creep מקבלים מהעובדה שבצענו את הניסויים בשתי מערכות חוטים העשויים מחומרים מקבלים מהעובדה שבצענו את הניסויים בשתי מערכות חוטים העשויים מחומרים מוליכי-על שונים. מכיוון שהתופעה הראשונה אינה קשורה לפוטנציאל הלכידה והתופעה השנייה קשורה אליו חזק, נצפה להתנהגות דומה באזור הנשלט ע"י התופעה השנייה קשורה אליו חזק, נצפה להתנהגות דומה באזור הנשלט ע"י המתנגדות הדינמית ולהבדל כמותי באזור בו זחילת השטף דומיננטי, זאת עקב השוני המתנגדות הדינמית ולהבדל כמותי באזור בו זחילת השטף דומיננטי, זאת עקב השוני באיזוטרופיה. ואכן, כל חוט מציג התנהגות אחרת במעבר בין התופעות. ב-BSCCO באיזוטרופיה. ואכן, כל חוט מציג התנהגות אחרת במעבר בין התופעות. ב-BSCCO מתקבל מעבר מתון יחסית וזאת מכיוון שהפלקסון מורכב מפנקייקים אשר כל אחד מהקבל מעבר מתון יחסית וזאת מכיוון שהפלקסון מורכב מפנקייקים אשר כל אחד מהם נילכד בשכבה Cu-O שלו והסימטריה יחסית לציר ס לא נשמרת, לעומת זאת ב-BSCCO מאם נילכד בשכבה כון הסימטריה יחסית לציר ס לא נשמרת, לעומת זאת מהם נילכד בשכבה Cu-O שלו והסימטריה יחסית לציר ס לא נשמרת, לעומת זאת ב-BSCCO מון התנהג כיחידה אחת יחסית לציר ס, המעבר הוא חד ב-BSCCO שלו הסימטריה יחסית לציר ס לא נשמרת, לעומת זאת מהם נילכד בשכבה Cu-O שלו והסימטריה יחסית לציר ס המערת, לעומת זאת ההם נילכד בשכבה אשר כל פלקסון מתנהג כיחידה אחת יחסית לציר ס, המעבר הוא חד האוד. השוני ב-U בין שני החומרים לא משפיע רק על החזקה של התלות המעריכית של המתח בזרם אלא גם קובע את קצב שינוי השיפוע של עקומת E-I וגם משך הופעה של הכתף בגרפים של E(t)

בניתוח של הגרפים בעזרת טרנספורמציית פורייה אנו רואים הרכב שונה של הרמוניות של הסיגנל בפאזה עם השדה והסיגנל שאינו בפאזה עם השדה. בסיגנל שאינו בפאזה עם השדה אנו מבחינים בהרמוניה שנייה בלבד, וזו מצביעה על התנהגות קרובה לליניארית. בסיגנל שבפאזה, חוץ מההרמוניה השנייה אנו מבחינים בהרמוניות קרובה לליניארית. בסיגנל שבפאזה, חוץ מההרמוניה השנייה אנו מבחינים בהרמוניות קרובה לליניארית. בסיגנל שבפאזה, חוץ מההרמוניה השנייה אנו מבחינים בהרמוניות קרובה לליניארית. בסיגנל שבפאזה, חוץ מההרמוניה השנייה אנו מבחינים בהרמוניות קרובה לליניארית. בסיגנל שבפאזה, חוץ מההרמוניה השנייה אנו מבחינים בהרמוניות קרובה לליניארית. בסיגנל שבפאזה, חוץ מההרמוניה שנייה אנו מבחינים בהרמוניות קרובה לליניארית. בסיגנל שניח מונית על כך שהמתח החשמלי המתקבל במוליך-על נובע מתופעות פיזיקאליות שונות.

אנו סבורים שעבודה זו מאחדת לראשונה כמה עבודות קודמות ומספקת תשובות לרוב השאלות הפתוחות. לראשונה, הוגדר בברור המכאניזם אשר מביא להיווצרות של השדה החשמלי בהפעלת שדה מגנטי AC בחוטים מוליכי-על. הרחבת תחום המדידות (זרם, תדר, אמפליטודה) אפשרה לראות לראשונה באותה סדרת ניסויים התנהגויות שונות איכותית ולפיכך עזרה להבין טוב יותר את המתרחש בעקומות E-I וגם שונות איכותית ולפיכך עזרה להבין טוב יותר את המתרחש השקומות להתאוי בזמן אפשרו להתבונן במתרחש במוליך-על מזווית אחרת ואפשרו את גילוי התופעות בזמן אפשרו להתבונן במתרחש במוליך-על מזווית אחרת ואפשרו את גילוי התופעות אשר לא נראו במדידות של עקומות E-I. בנוסף בגרפים (t) הוסברו ההזזות בפאזה והופעתם של שיאים משניים.

עבודה זו מהווה צעד נוסף בדרך להבנת הגורמים להפסדי אנרגיה בחוטים מוליכי-על. יישום המסקנות שנתקבלו כאן בתכנון סלילים ליישומי מוליכות-על תגדיל את היעילות של החוטים הללו בפרט ושל המערכות העושות בהם שימוש בכלל.

- ¹ E. Zeldov, N.M. Amer, G. Koren, and A. Gupta, *Appl. Phys. Lett.*, *56*, 1700 (1990).
- ² M. Cyrot, D. Pavuna, Introduction to superconductivity and Higt-T_c Materials, World Scientific, Singapore, (1995).
- ³ E. Zeldov et al., Appl. Phys. Lett. 56, (1990).
- ⁴ J. Groth, C. Reichhardt, C.J. Olson, S.B. Field, and F. Nori, *Phys. Rev. Lett.*, 77, 3625 (1996).
- ⁵ P.P. Huebener, *Magnetic flux structures in superconductors*, Springer-Verlag, New-York (2000).
- ⁶ B. Seeber, IoP Publishing, *Handbook of Applied superconductivity Bristol and Philadelphia*, page **173-186**, (1998).
- ⁷ Y. Yeshurun and A. P. Malozemoff, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 2202 (1988).
- ⁸ C. P. Bean, *Phys. Rev. Lett.* 8, 250, (1962).
- ⁹ V. Andrianov, V. Zenkevich, V. Kyrgyzov, V. Sychev, and F. Ternovsky, *JETF* 58,1523 (1970) (in Russian).
- ¹⁰ T. Ogasawara, Y. Takahashi, K. Kanbara, Y. Kubota, K. Yasohama and K. Yasukochi, *Cryogenics* 19, 736 (1979).
- ¹¹ T. Ogasawara, K.Yasukochi, S. Nose, and H. Sekizawa, *Cryogenics* 16, 33 (1976).
- ¹² G. M. Mikitic and E.H. Brandt, *Phys. Rev. B* 64, 1 (2001).
- ¹³ J.J. Rabbers, AC losses in superconducting tapes and coils, Proefschrift Universisteit Twente, (2001).
- ¹⁴ N. Shaked, "Electromagnetic power devices based on HTS", Ph.D. Thesis, Bar- Ilan University (2002).
- ¹⁵ A. Friedman, M. Zarudi, N. Shaked, S.Wolfus, M. Sinvani, and Y. Yeshurun, *Fault current limiters with the cores saturated by superconducting coils*, patent number: PTC/IL04/000073.
- ¹⁶ E.M. Leung, A. Rodriguez, G.W. Albert, B. Burley, M. Dew, P. Gurrola, D.Madura, G. Miyata, K. Muehleman, L. Nguyen, and S. Pidcoe, *IEEE Trasact. App.Supercond.*, 7 (1997).
- ¹⁷ G. Mikitik, and E. Brandt, *Phys. Rev B* **64**, 092502 (2001).
- ¹⁸ M.P. Risse, M.G. Aikele, S.G. Doettinger, R.P. Huebener, C.C. Tsuei, and M. Nat, *Phys. Rev. B*, **55**, 15191 (1997).
- ¹⁹ E.Y Andrei, Z.L. Xiao, W. Henderson, M.J. Higgins, P. Shuk, and M. Greenblatt, J. Phys. France, 9 (1999).
- ²⁰ J. J. Rabbers *et al.*, *Physica C* **300**, 1 (1998).
- ²¹ V. Roitberg, "The influence of AC magnetic field on HTS tape carrying DC transport current", M.Sc. Thesis, Bar-Ilan University (2005).
- ²² J. R. Clem, Supercond. Sci. Technol., **11** 909 (1998).
- ²³ http://www.amsuper.com.
- ²⁴ S. Asulay, A. Friedman, Y. Wolfus, F. Kopansky and Y. Yeshurun,

IEEE Trasact. App. Supercond., 16, 1067 (2006).
²⁵ N. Avraham, *et al*, *Nature* 411, 451 (2001).
²⁶ N. Shaked, *et al*, *App. Phys. Lett.*, 73, 3932 (1998).

Abstract

This work describes the first study of the mechanisms responsible for the energy loss in industrial YBa₂Cu₃O_{7- δ} (YBCO) tapes carrying DC current in the Cu-O planes, in the presence of an external AC magnetic field perpendicular to these planes. We measured the electric field *vs.* current (E-I) curves for different frequencies and amplitudes of the AC field. In addition, we measured the time evolution of the electric field, E(t), for different DC currents and different frequencies and amplitudes of the AC field. The results for YBCO are compared with results of similar measurements of industrial Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10- δ} (BSCCO) tapes. All the measurements were performed at 77 K.

The E-I measurements reveal that the AC magnetic field generates electric field already well below the critical current I_c , i.e. at currents where the DC magnetic field induces negligible electric field. The electric field increases with the increase of both the amplitude and frequency. At low frequencies, below an amplitude-dependent crossover frequency, the E-I curves can be described by a power law with, however, a clear crossover from a power of ~2 below I_c for both YBCO and BSCCO to powers ~15 and ~25 for BSCCO and YBCO, respectively. At high frequencies, below amplitude-dependent crossover frequency, the data cannot be described as a power law but by a polynom of order 2.

The E(t) measurements reveal different responses above and below I_c . For currents lower than I_c the response signal is sinusoidal, out of phase relative to the external AC magnetic field, superimposed on a DC baseline growing with I. Above ~ 1.1I_c the signal is sinusoidal, in phase with the external field, with a baseline growing with I. In the crossover current regime, the response signal is more complicated, exhibiting a "shoulder"-like feature in every half cycle of the signal, reflecting a superposition of the signals above and below I_c .

Similar behavior is observed for all measured AC amplitudes. Below a frequency-dependent crossover amplitude the E(t) signal is out of phase relative to the external field. Above this crossover amplitude the response signal is in phase. In the intermediate regime a shoulder observed in the signal reflects gradual change in the behavior of the phase. The baseline of the response is increasing with the amplitude.

The effect of frequency on the behavior of the E(t) curves is as follows: The signal is in phase at low frequencies up to an amplitudedependent crossover frequency above which the phase difference between the response and the external field is growing gradually.

We explain the observed different response above and below I_c , in E(t) and E-I measurements, by attributing the behavior to different physical mechanisms. The first, which dominates at low currents, appears due to the presence of AC magnetic field and is described by the "dynamic resistance" model: The applied DC current breaks the symmetry of the magnetic field profile resulting in a net flux flow from one edge of the sample to the other. This one way movement results in a non-zero time-averaged electrical field. The second phenomenon, which dominates at high currents, is the flux creep; flux lines move because the high current and/or the high magnetic field cause a decrease in the activation energy.

By comparing the results obtained for BSCCO and YBCO we are able to give additional support to the proposed scenario. At low currents we find the same response for both tapes, i.e. a power low dependence of E on I with a power ~2, as expected from the "dynamic resistance" model. At high currents and low frequency, BSCCO and YBCO yield different powers (~15 and ~25, respectively) as expected from the difference in their pinning energies.

The physical scenario that emerges from our experiments is therefore as follows: At low currents the activation energy is strong enough to minimize the effect of creep as compared to the effect induced by the AC current. Above I_c , U is relatively small and flux creep is the main reason for energy loss. The similar crossover is obtained by changing the amplitude and/or frequency of the applied AC field. Increasing the amplitude decreases U, as with increasing current, while decreasing frequency increases U due to the longer time window of the experiment.

Mechanisms for electric field evolution in Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10-δ} and YBa₂Cu₃O_{7-δ} tapes in a response to AC magnetic field

Lukovsky Gregory

Submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master's degree in the Department of physics, Bar-Ilan University

Ramat-Gan Israel