מהמחלקה לפיזיקה של אוניברסיטת בר-אילן

פרופי יוסף ישורון ופרופי אבנר שאולוב

עבודה זו נעשתה בהדרכתם של

ניסן היתשסייט

רמת-גן

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

דניאל לוי

$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ של מערך הפלקסונים בדגמי

השפעתם של פגמים גליליים על מצבים טרנזיינטים לא מסודרים

אוניברסיטת בר. אילן

תודות

ברצוני להודות מקרב לב לפרופסור יוסי ישורון ולפרופסור אבנר שאולוב שהנחו אותי בעבודה זו. לאמירת תודה זו מצטרפת הערכה גדולה לאנשים אלה על סבלנותם והאמונה ביכולת להשלים את העבודה.

ברצוני להודות לחברי המעבדה: ד״ר שוקי וולפוס, ד״ר אלכס פרידמן, ד״ר פאינה קופנסקי, אבי סנטו, מנחם כץ, ובפרט לחברי לעבודה במעבדה: רויטל קופליאנסקי, איליה סושניקוב וגרגורי לוקובסקי, אשר תמיד עזרו ותמכו במהלך יצירת העבודה. עבודה זו בוצעה במרכז למוליכות-על שבמחלקה לפיזיקה באוניברסיטת בר-אילן, ועל כן ברצוני להודות לראש המחלקה פרופי ריציארד ברקוביץי, סגן ראש המחלקה פרופי ליאוניד פייגל, פרופי בוריס שפירא ואייל דבש, ולצוות מזכירות המחלקה : רחל רוטברג ושרה ביאלקוביץי.

לחברי היקר דורון ברנס תודה מקרב לב, על הידע הרב והעזרה שהעניק לי.

למשפחתי ובפרט לאסנת אשתי האהובה על התמיכה הרבה בכל עת ובגידול מושלם של ילדינו מיכאל ותמר.

<u>תוכן עניינים</u>

1	פרק י
יאגראמת הפאזות שדה – טמפרטורהי	т 2.1
ותמת מגנטית של המעבר Order – Disordered	2.2 ח
צבים טרנזיינטים לא מסודרים של שריג הפלקסונים	ב 2.1
מני חיים של המצבים הטרנזיינטים	N 2.4
ערך הפלקסונים בנוכחות פגמים מלאכותיים	.2 מ
ואלות המחקרו	v 2.6
14 4	ירק
ערכת מגנטו אופטית	a 3.2
מערכת הניסיונית	3.2 ה
יבוד הנתונים	ע 3.:
דגם ותהליד ההקרנה	י.4 ה
25	ירק י
26 דירת שטף מגנטי בו זמנית לאזור המוקרן והלא מוקרן	1 .1
29 קומות מגנטיזציה לוקאליות ופרופיל האינדוקציה	4.2
קומות מגנטיזציה לוקאליות ליד שפות הדגם	4.:
37 קומות מגנטיזציה לוקאליות בקצבי סריקת שדה שונים	4.4 עי
40 שטף מגנטי דרך גבול ההקרנה	n 4.!
43קומות מגנטיזציה לוקאליות באזור המוקרן שליד הממשק	4.0
47	ירק ו
מני חיים ודינאמיקת השבר	N 5.
קומות מגנטיזציה ודינאמיקת השבר	ל.2 ע
מן החיים של מצבים טרנזיינטים ליד שפות הדגם50	n 5.
54 מן החיים של מצבים טרנזיינטים ליד הממשק	N 5.4
58	ירק '
יהוי כניסתו של המצב הטרנזיינטי	vi 6.2
שפעת ההקרנה על דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים	а 6.1
זרקה של מצבים טרנזיינטים דרך ממשק ההקרנה	ה 6.
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	7 6.4
	/ 0.4

פרק 2. תקציר

בעבודה זו נחקרה יצירה של מצבים טרנזיינטים לא מסודרים של מערך הפלקסונים, בגביש $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ אחיד, בקונפיגורציה ייחודית, בה חציו של הדגם נחשף להקרנה ביונים כבדים. ההקרנה יוצרת פגמים גליליים (columnar defects) בהם נלכדים הפלקסונים לכל אורכם. קונפיגורציה זו אפשרה לנו לערוך השוואה בין דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים באזור המוקרן, אל מול אלה שבאזור הלא מוקרן, *באותו הדגם*. מיפוי של התפלגות האינדוקציה בדגם, התקבל מתוך הדמיה מגנטו אופטית, בנוכחותו של שדה מגנטי חיצוני העולה בקצב קבוע. מיפוי זה, אפשר יצירה של עקומות מגנטיזציה בנקודות שונות בדגם, עבור סריקת שדה עולה בקצבים שונים. קיומם של מצבים טרנזיינטים לא מסודרים של מערך הפלקסונים, מתגלה בתלות של תופעת שיא המגנטיזציה השני בעקומות המגנטיזציה בקצב סריקת השדה. זיהינו את שדה ה-. של השיא השני, כאינדוקציה בה מוזרק המצב הטרנזיינטי הלא מסודר לדגם. B_{onset} , onset קביעה של המצבים שונים של סריקת שדה אפשרה לנו למדוד את זמני החיים של המצבים קביעה של B_{anset} הטרנזיינטים כפונקציה של האינדוקציה, B, בטמפרטורות שונות. מצאנו שבהזרקה של מצבים טרנזיינטים דרך שפת הדגם, זמני החיים באזור המוקרן התארכו משמעותית, יחסית לאלה שבאזור הלא מוקרן. ניתוח הנתונים הראה כי ההתארכות בזמן החיים באזור המוקרן מקורה לא רק בהנמכה של אינדוקצית המעבר סדר – אי-סדר, אלא גם בגידול משמעותי באנרגית האקטיבציה עבור הרפיה של המצבים הטרנזיינטים. הקונפיגורציה הייחודית של הדגם שלנו אפשרה לחקור גם יצירה של מצבים טרנזיינטים לא מסודרים באזור המוקרן כתוצאה של הזרקת מצבים מסודרים דרך הממשק שבינו ובין האזור הלא מוקרן. המדידות שלנו הראו כי אכן נוצרים מצבים טרנזיינטים כאלה, וזמן החיים שלהם זהה לזה של המצבים שהוזרקו מהשפה הטבעית של הדגם. הזרקתם של מצבים טרנזיינטים מתוך פנים הדגם (bulk), מאתגרת את הטענה כי מחסומי שפה לא הומוגניים הם הגורמים היחידים האחראים ליצירת המצבים הטרנזיינטים.

א

פרק 3. מבוא

<u>אגראמת הפאזות שדה. טמפרטורה 3/2</u>

כרקע למחקר העוסק בדינאמיקה של שטף מגנטי מערבולתי במוליכי על בטמפרטורות גבוהות (HTS), נתאר בפרק זה את דיאגראמת הפאזות במישור שדה-טמפרטורה של מוליכי-על אלה, (HTS), נתאר בפרק זה את דיאגראמת הפאזות במישור שדה-טמפרטורה של מוליכי-על אלה, תוך שימת דגש על מעבר הפאזה סדר – אי-סדר של מערך הפלקסונים במוליך-על. חומר מוליך-על מסוג שני מאופיין ביכולתו לדחות שדה מגנטי (אפקט מייזנר) [1] עד לשדה המגנטי הקריטי על מסוג שני מאופיין ביכולתו לדחות שדה מגנטי (אפקט מייזנר) [1] עד לשדה המגנטי הקריטי התחתון, הקרים במוליך ביכולתו לדחות שדה מגנטי (אפקט מייזנר) [1] עד לשדה המגנטי הקריטי התחתון, התחתון, הקרים ביכולתו לדחות שדה מגנטי חודר למוליך-על מקצותיו במנות של קווי שטף מגנטי הקריטי התחתון, התחתון, השטף מגנטי חודר למוליך-על מקצותיו במנות של קוונט של שטף מגנטי הנקראים פלקסונים (fluxons) או וורטקסים (vortices). כל פלקסון מכיל קוונט של שטף מגנטי, Φ_{c1} , החבית (של שדה הקריטי העליון, H_{c2} , החומר מגנטי, Φ_{c2} , כאשר H_{c2}^{-2} [G·cm²] החומר מניני מגנטי, Φ_{c1} לנורמלי. דיאגראמת הפאזות הייקלאסיתיי במישור דרש ל מוליך-על מסוג שני הופך לנורמלי. דיאגראמת הפאזות הייקלאסיתיי במישור באימר הקריטי העליון, בי החומר מציג מתוארת באיור 2.1. החלק התחתון, מתחת ל- H_{c1} , מתאר את מצב מייזנר, בו החומר מציג שני אמגנטיות מושלמת. החלק האמצעי, בין ה H_{c2} , מראה את המצב המעורב (state state) שבו חודרים הפלקסונים לדגם. החלק העליון, מעל L_{c2} , החומר נורמלי. ביצב המעורב,

. $a_{_0}pprox \sqrt{\phi_{_0}\,/\,B}$ המרחק הממוצע בין הפלקסונים $a_{_0}$ תלוי באינדוקציה המגנטית בדגם, לפי



ועדיץ איור 1.1/ דיאגראמת הפאוות של מוליך על מסוג שני ∗1/2.1 איור 2.1/

מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות, מציגים דיאגראמת פאזות עשירה עבור שריג הפלקסונים בגבישי במצב המעורב. איור 2.2 מתאר באופן סכמתי את הפאזות של שריג הפלקסונים בגבישי ה*Bi*₂Sr₂CaCu₂O₈₊₆, בהם תעסוק עבודה זו. האיור מתאר שלוש פאזות שונות של שריג הפלקסונים [2,3,4]: באזה מעין מסודרת בשדות נמוכים וטמפרטורות נמוכות, פאזה לא מסודרת (entangled): פאזה מעין מסודרת בשדות נמוכים וטמפרטורות נמוכות, פאזה לא מסודרת (entangled): בשדות גבוהים וטמפרטורות נמוכות ופאזה נוזלית בטמפרטורות גבוהות (5,6]. בשדות נמוכים ובטמפרטורות נמוכות האנרגיה האלסטית היא הדומיננטית ומאפשרת קורלציה ארוכת טווח בין הפלקסונים וכך יכולים הפלקסונים להסתדר במבנה של שריג מעין אסודר. במוליך-על "נקי" מפגמים הפלקסונים יכולים להסתדר במבנה גבישי (bpining) מסודר. במוליך-על "נקי" מפגמים הפלקסונים יכולים להסתדר במבנה גבישי (pinning) (pinning כתוצאה מכוחות דחייה אלקטרומגנטיים. הימצאותם של מרכזי לכידה הפלקסונים. ככל שהשדה המגנטי עולה וצפיפות הפלקסונים עולה, אנרגיית הלכידה נעשית הפלקסונים. ככל שהשדה המגנטי עולה וצפיפות הפלקסונים עולה, אנרגיית הלכידה נעשית דומיננטית יותר. הפלקסונים מסתבכים בינם לבין עצמם (entangled), וכך נוצרת הפאזה הלא

2



איור 3/3/ דיאגראמת הפאזות של שריג הפלקסונים ילקוחה מתוך מקור ^8/

הקשר שבין צפיפות הזרם הקריטי *j*, לפאזת מערך הפלקסונים קשור לאנרגיה הדומיננטית בפאזות השונות. ככל שאנרגית הלכידה דומיננטית יותר עבור הפלקסונים, קשה יותר לנתק אותם מבורות הלכידה. קושי בניתוק מערך הפלקסונים ממקומם מתורגם לזרם קריטי גבוה יותר. לפיכך הפאזה הלא מסודרת מאופיינת על ידי זרם קריטי גבוה יותר מאשר בפאזה המסודרת בה האנרגיה האלסטית דומיננטית [7,8].

התחרות בין האנרגיה האלסטית ואנרגית הלכידה באזור המעבר בין הפאזה המסודרת והלא מסודרת תקבע את מבנה מערך הפלקסונים. קו מעבר הפאזה סדר – אי-סדר הוא הקו בו ישנו שוויון בין האנרגיות. בכדי לאפיין את מעבר הפאזה סדר – אי-סדר, נתבונן בחותמת המגנטית של מעבר זה, בה נדון בסעיף הבא.

<u>Order – Disordered אנטית של המעבר 3/3</u>

החותמת המגנטיזציה הלוקאלית החותמת המגנטיזציה של מעבר הפאזה, מתקבלת מתוך צפייה בעקומות המגנטיזציה הלוקאלית המתקבלת בנוכחות שדה מגנטי חיצוני. מדידות לוקאליות של המצב המעורב נעשות באמצעות מתקבלת בנוכחות שדה מגנטי חיצוני. מדידות לוקאליות של המצב המעורב נעשות באמצעות שמתקבלת בנוכחות שדה מגנטי חיצוני. מדידות לוקאליות של המצב המעורב [10,11] מערך חיישני הול זעירים (Hall probe array) [9] או בטכניקות של מגנטו-אופטיקה H המגנטיזציה הלוקאלית מגנטי חיצוני. מדידות לוקאליות של המצב המעורב נעשות המתקבלת המעות המתקבלת המתקבלת המתקבלת המתקבלת המתקבלת המעות המגנטי חיצוני. מדידות לוקאליות של המצב המעורב נעשות המגנטי המתקבלת המתקבלת המתקבלת המתקבלת המצוני. מדידות לוקאליות המגנטיזציה המגנטיזציה המקומית ו-

הוא השדה החיצוני. באיור 2.3 אנו מציגים עקומת מגנטיזציה לוקאלית של גביש הוא השדה החיצוני. באיור 2.3 אנו מציגים עקומת מגנטיזציה לולית: החיצוני. באיור 2.3 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$. $\Delta M \propto j$ משקפת גידול אנומלי של הזרם הקריטי עם עליית השדה [2,13] בסביבות 350 אם $\Delta M \propto j$ (שליית השדה [2,13] בסביבות 20 השלי משקפת גידול אנומלי של הזרם הקריטי עם עליית השדה [2,13] בסביבות 350 או 350 המשקפת גידול אנומלי של הזרם הקריטי עם עליית השדה (30 משקפת גידול אנומלי של הזרם הקריטי עם עליית השדה [2,13] בסביבות 350 המשקפת גידול אנומלי של הזרם הקריטי עם עליית השדה [2,13] בסביבות 350 המשקפת גידול אנומלי של הזרם הקריטי עם עליית השדה [2,13] בסביבות 350 המשקפת גופראת של הזרם הקריטי עם עליית השדה [2,13] בסביבות 350 המשקפת זו נקראת (30 משקר מעריה שבאיור 2.3 [14], שני אפיונים עיקריים שדה ה-העקומה. לשיא השני שעל לולאת המגנטיזציה שבאיור 2.3 [14], שני אפיונים עיקריים שדה ה-העקומה. לשיא השני שעל לולאת המגנטיזציה שבאיור 2.3 [14], שני אפיונים עיקריים שדה ה-האנקומה. לשיא השני שעל לולאת המגנטיזציה שבאיור 2.3 [14], שני אפיונים עיקריים בשדה ה-מעקומה. לשיה ה-מקומה. לשיא השני שדה ה-מעקומה לעבר שיאה, שדה ה-Ba_{sme}) העקומה לענים שדה הינה שדה ה-מגנטיזציה שבאיור 3.5 [14], שני אפיונים עיקריים שדה ה-השקיה ה-מגנטים שדה ה-מגנטיזציה שבאיור 3.5 [14], שני אפיונים עיקריים בשדה ה-מקפיצה השדה ה-מקומה לעבר שיאה (מסודר (זרם קריטי גבוה). מדרת ניסויים המשלבים תוספת של שדה רוטט (ניסוי פוגין, משדה המעבר, המסודר (זרם קריטי גבוה). מכאן, ששדה המעבר, B_{onset} אוו B_{onset} או m_{anset} .



איור 3.74 לולאת מגנטיזציה לוקאלית של BSCCO בטמפרטורה של 25 K איור 73.4 לולאת מגנטיזציה לוקאלית של הקוחה ממקור הקריטי איור אינדוקציה של האנומלית של הזרם הקריטי הופעת השיא השניל מציינת את מעבר הפאזה סדר – אי. סדר/ האינדוקציה של האנומלית התופעה- B_{smp} - ושיאה מצוינים בחץ/

עם זאת, ניתן לראות מאיור 2.3, כי מעבר פאזה זה ״מרוח״ על פני עשרות גאוסים. בנוסף, מס זאת, ניתן לראות מאיור מאיור *B*_{smp} ו. *B*_{onset} זזים לערכים נמוכים יותר ככל מאפייני לולאת המגנטיזציה מראים תלות בזמן. שמקטינים את חלון זמן המדידה, על ידי גידולו של קצב עליית השדה החיצוני. כמובן שתלות זו

בזמן מקשה על זיהוי שדה המעבר התרמודינמי, B_{od} . ניסיונית ברור, שלזיהוי נכון של B_{onset} שורך במדידה בה קצב גידולו של השדה החיצוני איטי מספיק, כך שהקפיצה מ- B_{onset} לעבר במדידה בה קצב גידולו של השדה החיצוני איטי מספיק, כך שהקפיצה מ- B_{onset} לעבר g_{onset} תהיה חדה יותר. למריחה בגאוסים במאפייני עקומת, ולקושי באיתור שדה המעבר בעקבות תלותם של מאפייני עקומת המגנטיזציה בזמן, מצטרפת תופעה נוספת שנלמדה מתוך בעקומת המגנטיזציה בזמן, מצטרפת תופעה נוספת שנלמדה מתוך בעקומת המגנטיזציה הלוקאלית, והיא היעלמותו של קו המעבר בטמפרטורות נמוכות מתחת ל-עקומת המגנטיזציה הלוקאלית, והיא היעלמותו של קו המעבר בטמפרטורות נמוכות מתחת ל-עקומת המגנטיזציה הלוקאלית, והיא היעלמותו של קו המעבר בטמפרטורות נמוכות הסבר לתופעות אלה שנצפו בעקומת המגנטיזציה הלוקאלית, ניתן עם גילויים של *מצבים טרנזיינטים לא מסודרים* של שריג הפלקסונים [17]. בהם נדון בסעיף

)TDVS* מצבים טרנזיינטים לא מסודרים של שריג הפלקסונים 3/4

במדידות מגנטיות לוקאליות במערכת מגנטו-אופטית, זוהו מצבים טרנזיינטים מתוך פרופילים האינדוקציה המגנטית הנלקחים מהתמונה המגנטית הדו-ממדית [7,18]. דוגמא לפרופילים האינדוקציה המגנטית הנלקחים מהתמונה המגנטית הדו-ממדית [7,18]. דוגמא לפרופילים כאלה, שנלקחו עבור גבישי $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{s+\delta}$, מתוארת באיור 2.4. איור זה מראה את פרופיל האינדוקציה המגנטית המתפתח עם עליית השדה החיצוני כפונקציה של המקום בדגם. ניתן האינדוקציה המגנטית המתפתח עם עליית השדה החיצוני כפונקציה של המקום בדגם. ניתן המתאינדוקציה המגנטית המתפתח עם עליית השדה החיצוני כפונקציה של המקום בדגם. ניתן לראות בברור כי עד לאינדוקציה של כ-320 גאוס, מתפתחים עם הזמן פרופילים *יירגיליםיי,* המתאימים לפרדיקציות של מודל Bean [19]. מעל אינדוקציה של 250 גאוס מתקבל פרופיל בעל שני שיפועים שונים. שיפוע חזק באינדוקציות גבוהות ושיפוע פחות חזק באינדוקציות בעל שני שיפועים שונים. שיפוע חזק באינדוקציות גבוהות ושיפוע פחות חזק באינדוקציות מנסוכות. השוני בשיפוע נראה כ*יישבריי* ברור בפרופיל. השבר מתקדם אל מרכז הדגם עם גידולו של השדה החיצוני (מקומו של השבר מודגם באיור על ידי הקו הקטוע). שיפוע פרופיל האינדוקציה פרופיל אינדוקציה פרופיל מוכות. המוני בשיפוע נראה כ*יישבריי* בור בפרופיל. השבר מתקדם אל מרכז הדגם עם גידולו אינדוקציה פרופיל האינדוקצית פרופיל מערך הפלקסונים. לפיכך, מצב בו פרופיל האינדוקציה מראה שני שיפועים שונים מצביע על דו קיום של שתי פאזות בדגם בו זמנית. נקודת המעבר בין הפאזות נראית, כאמור לעיל, כשבר, דהיינו שינוי חד בפרופיל האינדוקציה.

5



איור 3/5/ פרופיל של האינדוקציה המגנטית המתפתח בזמן- כפונקציה של המיקום- B(x,t)- מתוך מדידות מגנטו אופטיות ^8^ הפרופילים מראים שינוי חד *#שבר#(באזור 411 גאוס/ השבר מעיד על דו קיום של פאזות שונות בדגס/ השיפוע הגדול יותר מתאים לשריג הלא מסודר/

אינדוקצית מעבר הפאזה, B_{od} , בדגם זה היא בסביבות 460 גאוס [7]. השיפוע החד יותר, הנצפה אינדוקציות נמוכות מ- B_{od} , מצביע על כך כי שריג הפלקסונים נמצא בפאזה הלא מסודרת באינדוקציות נמוכות מ- B_{od} , מצביע על כך כי שריג הפלקסונים נמצא בפאזה הלא מסודרת למרות שהמצב התרמודינמי באינדוקציות אלה אמור להיות מסודר (השיפוע המתון יותר משויך לפאזה המעין מסודרת). תצפית זו מעידה על כך שהמצב הלא מסודר, בהיותו המצב השויך לפאזה המעין מסודרת). תצפית זו מעידה על כך שהמצב הלא מסודר השיפוע המתון יותר המצויך לפאזה המעין מסודרת). תצפית זו מעידה על כך שהמצב הלא מסודר, בהיותו המצב היילא נכון" מבחינה תרמו דינאמית, חייב להעלם עם הזמן. כאשר מפסיקים את עליית השדה היילא נכון" מבחינה תרמו דינאמית, חייב להעלם עם הזמן. כאשר מפסיקים את עליית השדה טריצוני, נעלם השיפוע החד יותר עם הזמן כלומר, הפאזה הלא מסודרת היא זמנית, טרנזיינטית. הזמן הדרוש להיעלמותה של הפאזה הטרנזיינטית מגדיר את ייזמן החיים" שלה, עליו נדון בסעיף הבא.

3/5 זמני חיים של המצבים הטרנזיינטים

כאשר קיימים מצבים טרנזיינטים נצפה כאמור, לשינוי ברור (״שבר״) בשיפועו של פרופיל האינדוקציה. שבר זה, הנמדד מגנטו אופטית, מסמן גבול ברור בין המצב הטרנזיינטי למצב התרמו דינאמי ומאפשר מעקב אחרי הדינאמיקה של המצבים הטרנזיינטים. השבר מסמן את חזית השטף המגנטי של הפאזה המשתלטת עם הזמן בדגם, וכיוון תנועת השבר מסמן מהי הפאזה היימשתלטתיי. דינאמיקת הגבול בין הפאזה המסודרת למצב הטרנזיינטי הלא מסודר הפאזה היימשתלטתיי. דינאמיקת הגבול בין הפאזה המסודרת למצב הטרנזיינטי הלא מסודר נקבעת על ידי התחרות בין קצב היצירה של המצבים הטרנזיינטים לבין קצב ההרפיה שלהם [7,20]. כאשר הדגם נמצא בשדה מגנטי קבוע השבר נע עם הזמן לכיוון קצות הדגם, עובדה המצביעה על ההרפיה של המצבים הטרנזיינטים הלא מסודרים שהוזרקו לדגם. ניתן לאפיין את המצביעה על ההרפיה של המצבים הטרנזיינטים הלא מסודרים שהוזרקו לדגם. ניתן לאפיין את המצביעה על ההרפיה של המצבים הטרנזיינטים הלא מסודרים שהוזרקו לדגם. ניתן לאפיין את המצביעה על ההרפיה של המצבים הטרנזיינטים אם היה מגנטי קבוע השבר נע עם הזמן היון ליגם. ניתן הפיין את המצבים הטרנזיינטים על ידי זמן חיים, $\tau(B,T)$, התלוי באינדוקציה המגנטית בדגם ובטמפרטורה. מדידות מראות שזמן החיים מתארך ככל שהאינדוקציה המגנטית תתקרב לערכו של שדה המעבר התרמו דינאמי, B_{od} הינו הלא מסודר. איור 2.5 מסכם מדידות [20,21] של זמני התרמו דינאמי המועדף מעל ל- B_{od} , כתלות בטמפרטורה, ובקרבה לשדה המעבר בהתאם.



 B_{od} איור אמעבר נרמול לשדה המעבר איור איור איור איור איז ספקטרום איני החיים- au(B,T) - הלקוח ממקור איור איור איור איז ספקטרום איור איז המעבר איז המעבר איז המעבר איז ממנו א

מתוך מדידות אלה ניתן לתאר, באופן סכמתי, את תחום הקיום של המצבים הטרנזיינטים בדיאגראמת הפאזות של מערך הפלקסונים. איור 2.6 מראה באופן סכמתי את דיאגראמת הפאזות של שריג הפלקסונים כאשר המצבים הטרנזיינטים נלקחים בחשבון. האזור האפור מראה את תחום הקיום של המצבים הטרנזיינטים. חשוב לציין, כי תחום זה יקטן ככל שחלון זמן המדידה יתארך.



איור 3/7 תחום הקיום של המצבים הטרנזיינטים/ תחום זה ימסומן באפור (תלוי בחלון זמן המדידה/

כפי שציינו לעיל, גילויים של המצבים הטרנזיינטים סיפק הסבר טבעי לתופעות הקשורות בשיא השני שעל עקומת המגנטיזציה, כגון המריחה במעבר בין מאפייני עקומת המגנטיזציה, ולתלותם בזמן. היעלמותו של קו המעבר בטמפרטורות נמוכות הוסברו בכך, שזמני החיים של המצבים הטרנזיינטים בטמפרטורות נמוכות כה ארוכים, שיש לחכות זמן רב עד שייעלמו שתתאפשר צפייה במעבר.

מקובל לחשוב שמקורם של המצבים הטרנזיינטים הוא במחסומי שפה לא הומוגניים הגורמים מקובל לחשוב שמקורם של המצבים הטרנזיינטים הוא במחסומי שפה לא הומוגניים הגורמים לכניסה לא קוהרנטית של הפלקסונים כשהם ״מוזרקים״ מבחוץ (בנוכחות שדה עולה). קביעה זו מבוססת בעיקר על ניסוי תובלה (transport) ייחודי בקונפיגורצית קורבינו [22,23]. בניסוי זה, נטרלו את שפות הדגם מלהשפיע על מערך הפלקסונים, ומצבים טרנזיינטים לא הוזרקו לדגם. אחת משאלות המחקר שלנו קשורה ישירות לשאלת מקורם של המצבים הטרנזיינטים.

אנו ננסה להבין האם תיתכן גם יצירה של מצבים טרנזיינטים בתוך החומר (Bulk) ולא רק מהזרקתם משפות הדגם. בכדי לענות על שאלה זו יצרנו באופן מלאכותי, שני אזורים בדגם בעלי זרם קריטי שונה וחיפשנו אחר מצבים טרנזיינטים כאשר הפלקסונים מוזרקים מתוך החומר דרך הגבול בין האזורים השונים. את השינויים בזרם הקריטי יצרנו בעזרת הקרנה ביונים כבדים עתירי אנרגיה. ההקרנה יצרה פגמים מלאכותיים באזור נבחר בדגם, כמתואר בסעיף הבא.

3/6 מערד הפלקסונים בנוכחות פגמים מלאכותיים

פגמים בחומר מוליך-על מתפקדים כמוקדי לכידה (pinning centers) עבור שריג הפלקסונים ולכן יוצרים הפרעות בשריג. ככל שהשדה המגנטי עולה וצפיפות הפלקסונים עולה, אנרגיית הלכידה נעשית דומיננטית יותר. הפלקסונים מסתבכים בינם לבין עצמם (entangled), ויוצרים את הפאזה הלא-מסודרת. הכוח הדרוש לניתוק שריג הפלקסונים ממוקדי הלכידה מגדיר את . צפיפות הזרם הקריטי, j_c , ולכן פגמים בחומר מוליד-על גורמים להגברה של הזרם הקריטי. פגמים בגביש מוליך על בטמפרטורות גבוהות, נוצרים באופן טבעי בגידול הגביש. ניתן להגדיל את ריכוז הפגמים בדגם באופן מלאכותי על ידי הקרנת החומר באלקטרונים או בפרוטונים point defects) או על ידי הקרנה ביונים כבדים עתירי (point defects), או על ידי הקרנה ביונים כבדים אתירי אנרגיה היוצרים פגמים גליליים (columnar defects) במוליך-על [26,27]. המחקר בעבודה זו התבצע בדגם אשר הוקרן בחלקו ביונים כבדים, שיצרו פגמים גליליים בדגם. הקרנה ביונים כבדים הוצעה כדרך להגדלת הזרם המתמיד במוליכי-על בטמפרטורות גבוהות [28,29]. חדירת היונים האנרגטיים בחומר, יוצרים מסלול גלילי של חומר נורמלי בגביש. מספר הפגמים ליחידת , B_{ϕ} ,matching field שטח, n , המגדיר את מינון ההקרנה מתורגם לערכי שדה מגנטי הנקרא ,nכאשר היא סך האינדוקציה המורכבת מפלקסונים שנלכדו בפגמים . $B_{\phi}=n\phi_{0}$ כאשר כאשר . $B_{\phi}=n\phi_{0}$ תזוזה של הקו האי-רוורסבילי במישור H-T לערכי שדות וטמפרטורות גבוהים יותר, עלייה בזרם הקריטי והנמכה של שדה המעבר, B_{ad} , באמצעות ניסוי ייחודי בו הוקרנו בישים

9

יחידים מסוג $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ בחלקיקי הב אנרגטיים (בסדרי גודל של $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ הדגם, נצפה באמצעות הדמיה מגנטו אופטית, מעין מחסום למעבר של שטף מגנטי, בין האזור המוקרן והלא מוקרן [30], ובכך הזרקה של מצבים טרנזיינטים לא מסודרים מתוך הדגם. ההקרנה האנרגטית יצרה פגמים גליליים (columnar defects) בחצי הדגם המוקרן, ובכך נוצרו שני אזורים באותו הדגם בעלי כוחות לכידה שונים, כאשר באזור המוקרן כוחות הלכידה משמעותיים יותר מהאזור שלא הוקרן, ונוצר ממשק (interface) בין אזורים אלה בדגם. בקונפיגורציה זו נוצר מצב בו שטף מגנטי מוזרק לאזור המוקרן דרך הממשק ובנוסף, שטף מגנטי מוזרק בו זמנית דרך שפות הדגם לאזור מוקרן ולאזור לא מוקרן. ההקרנה התבצעה במינונים נמוכים מאוד ($B_{\phi} << B_{cd}$) בהשוואה לניסויים המקובלים. השפעתה של הקרנה במינון כה נמוך בגבישי $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$, נחקרה בעבר באזור קו המעבר בטמפרטורות גבוהות (melting line), גם בטמפרטורות נמוכות של כ-30K [34]. מחקרים אלה עסקו בהשפעת ההקרנה על *התרמודינמיקה* של דיאגראמת הפאזות של חומר הפלקסונים. בעבודה זו אנו נרצה לבדוק את השפעת ההקרנה על *דינאמיקת* המצבים הטרנזיינטים. אנו נבדוק האם השפעה זו מתבטאת בדיכויים של המצבים הטרנזיינטים או בהגברתם כתוצאה מפגמים גליליים שנוצרו במהלך ההקרנה. כמו כן, נעקוב אחר התפתחות המצבים הטרנזיינטים, ליד הממשק שבין האזור המוקרן והלא מוקרן.

<u>אלות המחקר /3/7</u>

מסעיפי המבוא עולות בברור שתי שאלות מחקר איתן נתמודד בעבודה זו.

1. האם תיתכן יצירה של מצבים טרנזיינטים לא רק דרך שפת הדגם הטבעיות! כלומר, האם. ניתן לייצר מצבים טרנזיינטים בתוך הדגם (bulk)?

 מהי ההשפעה של פגמים גליליים בצפיפות נמוכה, על הדינאמיקה וזמני החיים של המצבים הטרנזיינטים?

בשאלות אלה נטפל בפרקים הבאים. בפרק 3 נתאר את המערכת המגנטו אופטית בה השתמשנו בעבודה זו, ונוסיף פרטים על ההקרנה ביונים כבדים. בפרק 4 נראה את התוצאות שהתקבלו מעקומות מגנטיזציה לוקאליות שנותחו מתוך הדמיות מגנטו-אופטיות. בפרק 5 נערוך השוואה, המבוססת על הדינאמיקה של המצבים הטרנזיינטים, בין האזור המוקרן ובין הלא מוקרן. נתמקד בהשוואה של זמן החיים τ , קבוע הזמן τ_0 , שדה המעבר התרמו דינאמי סדר – אי-סדר, B_{od} , ונדון בשוני שבין האזורים בפרמטרים אלו. כמו כן, נשווה בין חדירה של שטף מגנטי דרך שפת הדגם ובין הממשק, לאזור המוקרן. בפרק 6 נסכם את תוצאות העבודה.

פרק 4. שיטות המחקר

בעבודה זו אנו עושים שימוש במערכת המגנטו-אופטיקה המאפשרת מדידה של התפלגות האינדוקציה המגנטית בדגם ותלותה בזמן, בנקודות שונות בדגם בו זמנית. מדידה במערכת זו האינדוקציה המגנטית בדגם, כך שניתן לבצע מספר רב של מדידות בתנאים שונים, באותו בדגם. מדידה אינה פוגמת בדגם, כך שניתן לבצע מספר רב של מדידות בתנאים שונים, באותו בדגם. מדידה האינה פוגמת בדגם, כך שניתן לבצע מספר רב של מדידות בתנאים שונים, באותו בדגם. מדידה היא מינה פוגמת בדגם, כך שניתן לבצע מספר רב של מדידות בתנאים שונים, באותו בדגם. מדידה היא מינה פוגמת בדגם, כך שניתן לבצע מספר רב של מדידות בתנאים שונים, באותו בדגם. מדידה היגה פוגמת בדגם, כך שניתן לבצע מספר רב של מדידות בתנאים שונים, באותו בדגם. מדידה היא מינה פוגמת של המגנטיזציה הלוקאלית של האינדוקציה והתפלגותה כתלות בזמן, מאפשרת מדידה של המעסקר העוסק הלוקאלית של מצבים טרנזיינטים. בסעיפים הבאים נתאר את עיקרון הפעולה של טכניקת המגנטו אופטיקה של מצבים טרנזיינטים. בסעיפים הבאים נתאר את עיקרון הפעולה של טכניקת המגנטו אופטיקה של מצבים טרנזיינטים. בסעיפים הבאים נתאר את עיקרון הפעולה של טכניקת המגנטו אופטיקה ואת מערכת הניסוי המשלבת טכניקה זו. בהמשך נתאר כיצד אנו ממירים את ההדמיה המגנטו אופטית כך שנוכל לחלץ מתוכה את התפתחות האינדוקציה והמגנטיזציה ההדמיה המגנטו אופטית כך שנוכל לחלץ מתוכה את התפתחות האינדוקציה והמגנטיזציה בדגם עם הזמן. בעבודה זו אנו עושים שימוש בדגם $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ שהוקרן בחלקו. על הקרנה זו נפרט בסוף הפרק.

4/2 מערכת מגנטו. אופטית

עקרון הפעולה של מערכות מגנטו-אופטיות טמון באינטראקציה בין אור מקוטב למומנט מגנטי. חומרים מגנטים מסוימים מסוגלים להשפיע על האור העובר דרכם על ידי סיבוב מישור הקיטוב (אפקט פרדיי). הגודל והכוון של סיבוב זווית הקיטוב תלויים באינדוקציה המגנטית הלוקאלית, B_z , בקבוע Verdet (V), שהוא קבוע של החומר, ובמרחק שהאור עובר בחומר, b, לפי $B_z = VB_z d$. חומרים בעלי תכונה זו מכונים חומרים פעילים מגנטו-אופטית [11] רגישותם של חומרים אלה לאינדוקציה הלוקאלית, מאפשרת מיפוי של אינדוקציה מגנטית בחומרים שאינם פעילים מגנטו-אופטית. במקרה כזה חומרים אלה נקראים *אינדיקטורים*. כאשר אנו רוצים למפות אינדוקציה של חומר מוליך על, אל האינדיקטור להיות גדול מגודל הדגם מכיוון שהשטף המגנטי כתוצאה מזרמי שפה נמצא גם מחוץ לדגם. בעבודה זו נעשה הדגם מכיוון שהשטף המגנטי כתוצאה מזרמי שפה נמצא גם מחוץ לדגם. בעבודה זו נעשה שימוש בפילם 50,20 (Bi,Lu) (Bi,Lu) שבו המומנט המגנטי הוא במישור הפילם, המגודל על שימוש בפילם 20,11 (Bi,Lu) שכבת (Bi,Lu) (GGG) שקופה בעובי של 20.2.0 מיימ (10,11]. שכבת (GGG) אימון שכבת (Gallium Gadolinium Garnet (GGG) אימוים בעובי של 10,11 מיימ מגנטו- אינדיקטורים אלה מגיעים לרוויה באזור 1000 גאוס. בכדי להשתמש בחומר הפעיל מגנטו- אינדיקטורים אלה מגיעים לרוויה באזור 1000 גאוס. בכדי להשתמש בחומר הפעיל מגנטו- אינדיקטורים מגיעים לרוויה באזור 1000 גאוס. בכדי להשתמש בחומר הפעיל מגנטו- באינדיקטורים מסוג זה.



איור 4⁄2/ תיאור מבנה האינדיקטור בעל מומנט במישור המונח על דגם- ותיאור מסלול האור המוחזר ממנ*ו*

אור מקוטב מגיע במאונך למשטח, עובר דרך שכבת ה-GGG, ולאחר מכן עובר דרך השכבה הפעילה מגנטו-אופטית, שעובייה μm 0.1-1, בשכבה זו זווית הקיטוב משתנה בהתאם הפעילה מגנטו-אופטית, שעובייה M_z , הנקבע על ידי רכיב האינדוקציה המגנטית הלוקאלית הניצב למומנט המגנטי הניצב לדגם, M_z , הנקבע על ידי רכיב האינדוקציה המגנטית הלוקאלית הניצב לדגם, B_z , הנוצר כתגובה לנוכחותו של שדה חיצוני, H_z . האור העובר את השכבה מוחזר לדגם, B_z , הנוצר כתגובה לנוכחותו של שדה חיצוני, ואור העובר את העכבה הפעילה, לדגם, גם מחזירה דקה (מאות ננו-מטר) של זהב או אלומיניום הנמצאת מתחת לשכבה הפעילה, ועובר שוב בשכבה הפעילה בדרכו החוצה. בקונפיגורציה זו האור עובר פעמיים דרך השכבה הפעילה, ולכן מהלך זה מכפיל את הרגישות לאינדוקציה הלוקאלית, שכן זווית הסיבוב של הפעילה, ולכן מהלך זה מכפיל את הרגישות לאינדוקציה הלוקאלית, שכן זווית הסיבוב של TiO מישור הקיטוב מוכפלת לפי $B_F = VB_Z 2d$ מתחת לשכבה המחזירה נמצאת שכבה של 2-3 μ m על מנת להגן משריטות. עובי השכבה הפעילה וגובהו של האינדיקטור מעל הדגם (m-20) הם הקובעים את הרגישות והרזולוציה המרחבית של המידיה. אמנם ניתן להצמיד את

האינדיקטור לדגם כך שהרזולוציה המרחבית תגיע לכ- μm, 1, אך המגבלה העיקרית על האינדיקטור לדגם כך שהרזולוציה המרחבית היא אורך הגל של האור שנמדד [35]. בסעיף הבא נראה כיצד מערכת הרזולוציה המרחבית היא אורך הניסיונית.

4/3 המערכת הניסיונית

סביב החומר הפעיל מגנטית, האינדיקטור, המוצמד לדגם, נבנתה מערכת ניסיונית כך שניתן להניח בה דגם מוליך-על, לקרר אותו, לבצע מדידות מגנטו-אופטיות בתנאים שונים, ולאסוף את נתוני הדמיות אלה דיגיטאלית. מערכת הניסוי מתוארת, סכמאתית, באיור 3.2 מורכבת מתתי מערכות, באופן הבא:

- Oxford על ידי שנבנתה על ידי 1. קריאוסטט (תא) לזרימה מתמשכת של הליום נוזלי, שנבנתה על ידי 1. Instruments הקריאוסטט עשוי מפלדת אל-חלד. החלק הפנימי הקר ("אצבע קרה") עשוי מנחושת וסביבו יש מגן קרינה מחורץ מאלומיניום למניעת זרמי מערבולת כתוצאה מנוכחותו של שדה מגנטי.
- הטמפרטורה נשלטת על ידי שני סנסורים (AlGaAs-diode) המוצמדים לאצבע הקרה.
 אחד הסנסורים מוצמד בבסיס האצבע הקרה והשני מוצמד לחלקה העליון של האצבע סמוך לדגם. בדרך זו ניתן לשמור על טמפרטורה יציבה. הסנסור שבבסיס האצבע
 ITC502 משמש כמחמם התנגדותי. רכיבים אלה נשלטים על ידי בקר טמפרטורה Oxford Instruments.
- 3. הקריאוסטט בנוי כך שניתן להניח עליו סליל נחושת, כך שהדגם המוצמד לאצבע הקרה ועליו האינדיקטור נמצאים במרכזו של הסליל, והוא משרה שדה מגנטי הומוגני על ועליו האינדיקטור נמצאים במרכזו של הסליל, והוא משרה שדה מגנטי הומוגני על הדגם. הזרם בסליל מוכתב על ידי ספק זרם של KEPCO, הנשלט על ידי 0.1 הדגם. הזרם בסליל מוכתב על ידי ספק זרם של ספר של חסריקות שדה בקצבים הנעים מ- 0.1 מחולל אותות, 2005 802. עד לשדה של 2000 המושרה על ידי הסליל, ניתן לבצע סריקות אדי הסליל, ניתן לבצע סריקות אותות, 2000 Oe/sec
- על גבדי לצפות באור העובר Leila אל DMRM אל המערכת האופטית כוללת מיקרוסקופ. 4. המערכת האופטית כוללת מיקרוסקופ אר דרך החלון האופטי של הקריאוסטט, עם אובייקטים low-strain דרך החלון האופטי של הקריאוסטט, א

קיטוב האור, בהגדלות של 2.5, x2, x10 ו-x20. למערכת שני מקורות אור : מנורת הלוגן ומנורת כספית, שתיהן מיוצבות. האור המסופק ממנורות אלה עובר תחילה דרך מסנן קרינת UV ו- IR, ולאחר מכן דרך פילטר ירוק. ההגבלה לאורך גל מסוים נעשית על מנת להימנע מדיספרסיה בתגובה של האינדיקטור. האור הנכנס עובר דרך מקטב ומנותב אל הדגם. בדרכו חזרה, לאחר שעבר באינדיקטור, האור עובר דרך -Analyzer מקטב שניתן לשלוט בזווית שלו בתחום של 360 מעלות.

.5 לאחר המעבר ב- Analyzer האור מגיע למצלמת CCD של ECD. המצלמה
25 מעבירה את התמונות למחשב דרך frame grabber. המצלמה מסוגלת לצלם 25 מעבירה את התמונות למחשב דרך 1000 תמונות בשנייה עבור אזור של 16x16 פיקסלים) ו-1000 תמונות בשנייה עבור אזור של 36



איור 4/3/ תיאור סכמאתי של המערכת המגנטו אופטית הניסיונית- בה השתמשנו בעבודה זו∕ המערכת כוללת קריאור סט לזרימת הליום נוזלי- מיקרוסקופ אופטי מקטב- סליל נשלט זרם ומצלמת CCD המופעלת באופן ממוחשב∕

לסיכום, האור שמספקת נורת ההלוגן/כספית עובר דרך פילטרים, מקוטב ליניארית ואז עובר דרך אובייקטיב ודרך חלון הקריאוסטט. כל הרכיבים האופטיים הללו אינם משפיעים על הקיטוב. האור המקוטב פוגע באינדיקטור המונח על הדגם ומוחזר ממנו, ובתהליך זה משתנה קיטוב האור. האור המוחזר עובר דרך מקטב שני המאונך למקטב הראשון ממנו הגיע האור, נקלט במצלמה ומועבר למחשב. השינוי בזווית הקיטוב של האור המוחזר ביחס למקטב הראשון, משקף את התפלגות השדה המגנטי על האינדיקטור. ולכן אם,למשל, בנקודה מסוימת האינדוקציה הייתה אפס, הפיקסל המתאים יראה חושך, כיוון שהאינדיקטור לא סובב את זווית הקיטוב של האור. בנקודה אחרת, בה הייתה אינדוקציה, הפיקסל המתאים יקבל עוצמת אור גבוהה יותר. בצורה כזו מתקבלת תמונה מגנטו-אופטית של התפלגות האינדוקציה בדגם מוליד-על. מערכת זו המשתמשת בטכניקת המגנטו-אופטיקה, מתאימה מאד למחקר העוסק בדינאמיקה של מצבים טרנזיינטים בטווח רחב של טמפרטורות וסריקות שדה חיצוני. התמונות המתקבלות מהמצלמה מראות תמונה איכותית טובה של התפלגות האינדוקציה על הדגם ושל זרמי השפה סביבו. עם זאת, על מנת לעקוב אחרי תופעות פיזיקאליות דינאמיות הקשורות בשטף מגנטי מערבולתי, יש לתרגם את התמונות מהתפלגות של עוצמת אור להתפלגות של עוצמת שדה, עליו נרחיב בסעיף הבא. דוגמא להדמיה מגנטו-אופטית טיפוסית ופרופיל .3.3 האינדוקציה הנוצר לרוחב הדגם מוצגים באיור



איור 4/4/ הדמיה מגנטו. אופטית של דגם מוליך. על בנוכחות שדה מגנטי עולה- המדגימה את היכולת לצפות באיור 4/4/ הדמיה מגנטו. אופטית עם עליית בהתפלגות האינדוקציה (a) ההדמיה המתקבלת- משמאל לימין- של התפלגות האינדוקציה הזמנית עם עליית

השדה החיצוני- מ. O O ל. 2000e/ אזור בהיר יותר מצביע על אינדוקציה גבוהה יותר/ (b) התפתחות בזמן עם עליית השדה של פרופיל האינדוקציה המגנטית שנלקח באזור המלבני המקווקו- כפונקציה של המיקום בדגם/ לקוח ממקור [36]/

4/4 עיבוד הנתונים

בכדי לתרגם את ההדמיה המגנטו-אופטית לגדלים של אינדוקציה מגנטית התלויה בזמן ובמרחב, עלינו לבצע תהליך של כיול של ההדמיה. בעזרת כיול נכון וניתוח מתאים, ניתן לחלץ מתוך הדמיות מאפיינים מגנטיים של הדגם הנמדד כגון, אינדוקציה מגנטית, מגנטיזציה, וזרם מתוך הדמיות מאפיינים מגנטיים של הדגם הנמדד כגון, אינדוקציה מגנטית, מגנטיזציה, וזרם קריטי. בשלב הראשון בכיול הנתונים אנו מנרמלים את התפלגות האור על פני האינדיקטור אינה קריטי . בשלב הראשון בכיול הנתונים אנו מנרמלים את התפלגות האור על פני האינדיקטור אינה מומוג זה בא כדי למנוע טעויות בניתוח הנובעות מכך שהתפלגות האור על פני האינדיקטור אינה Malus (סמול זה בא כדי למנוע טעויות בניתוח הנובעות מכך שהתפלגות האור על פני האינדיקטור אינה הומוגנית, וכן הימנעות מאפקטים לא ליניאריים כמו תגובת האינדיקטור וחוק מאלוס (Malus), וכן ממקורות רעש כמו המצלמה ופגמים באינדיקטור. תהליך נרמול האור מתבצע מחדש בעבור כל ניסוי באופן הבא באימות נלקחת סדרת תמונות (100 תמונות) "יחושך" (Dark) כאשר מפתח המצלמה מכוסה. המטרה היא למדוד את העוצמה הנובעת מרעש אלקטרוני במצלמה. עבור כל ניסוי באופן הבא באים המטרה היא למדוד את העוצמה הנובעת מרעש אלקטרוני במצלמה. מתוך מיצוע במרחב של 4x4 פיקסלים של סדרת התמונות של התקבלת תמונת החושך. בשלב המתוך מיצוע במרחב של 4x4 פיקסלים של סדרת התמונות של התפגעת מרעש אלקטרוני במצלמה. המתוך מיצוע במרחב של 4x4 פיקסלים של סדרת התמונות של התפגעת החושך. בשלב המתוך מיצוע במרחב של 4x4 פיקסלים של סדרת התמונות של התפגעת העובע אותנית החושך. בשלב המתוך מיצוע במרחב היו נלקחת כאשר הזווית בין המקטבים היא 2⁰ כך שנוכל לקבל תמונה במענה הפעלת שדה. סדרה זו נלקחת כאשר הזווית בין המקטבים היא ² כך שנוכל לקבל תמונה הפעלת שדה. סדרה זו נלקחת כאשר הזווית בין המקטבים היא ² כך שנוכל לקבל תמונה (Field הפעונות שליות מתונת "שדה אפסי" (Field היישימוש באלווריתם הבא: ידי שימוש באלווריתם הבא: ידי שימוש באלווריתם הבא: ידי שימוש באלווריתם הבא: ידישים שליוו לייול העוצמה, ידישים שליווית בתמונות עדידים באלווריתם הבא: ידישים שליווית מתונות עדידים באלווריתם הבא: ידישים שליווית מתונות היישים שליווית מתונות ידישים שליווית מתונת ידישים שליווית מתונות שליווית מתונות מתונת ידישים שליווית מתונת מתונות שליווית מתונות מתונות מתו

$$I_{norm}(x, y) = \frac{I(x, y) - ZF(x, y)}{ZF(x, y) - D(x, y)}$$

לאחר נרמול התמונה, השלב נבא בתהליך הכיול הוא תרגום העוצמה של התמונה המנורמלת למטריצת אינדוקציה מגנטית B(x, y). לצורך כך אנו מייצרים טבלת ערכים שבה לכל רמת אפור מותאם שדה מגנטי בגאוסים. לצורך כך אנו מבצעים סדרת תמונות, כאשר שדה חיצוני עולה בקצב קבוע קטן. האזור הנמדד כעת (4x4 פיקסלים), מרוחק מהדגם מתוך הנחה כי נקודה זו מושפעת מהשדה החיצוני בלבד, ולא מתקבלת תרומה לעוצמה כתוצאה מנוכחותו

של הדגם. איור 3.4 מציג את הגרף ממנו אנו מוציאים את טבלת הכיול המקשרת בין רמת אפור מסוימת לשדה מגנטי בגאוסים.



איור 4/5/ הקשר בין רמת אפור לשדה המגנטי שעל האינדיקטור- בו נשתמש לניתוח הנתונים/

ידע של האינדוקציה המגנטית מתוך ההדמיות המגנטו-אופטיות, יכול לשמש אותנו, לפי אופן ניתוח הנתונים, לחלץ פרמטרים שונים . בעבודה זו אנו משתמשים בטכניקת המגנטו-אופטיקה על בכדי ליצור עקומות מגנטיזציה לוקאליות, M(B). בעזרת מדידה של התפלגות האינדוקציה, על בכדי ליצור עקומות מגנטיזציה לוקאליות, H_Z , ניתן לקבל את המגנטיזציה הלוקאלית, $B_Z(x,y)$, כפונקציה של השדה החיצוני, H_Z , ניתן לקבל את המגנטיזציה הלוקאלית, האינדוקציה מתוך הקשר $M(x,y)=B(x,y)-H_{ext}$ עקומות מגנטיזציה הלוקאליות, הלוקאליות ואופיין עומדות במרכז ניתוח התוצאות, כפי שנראה בפרק הבא. כל האמור לעיל, בכדי לאפיין את דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים בדגם מוליך-על שהוקרן בחלקו. על הדגם המוקרן נרחיב בסעיף הבא.

<u>4/5 הדגם ותהליד ההקרנה</u>

floating zone המחקר בעבודה זו נעשה בגביש $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ אחיד, שגודל בשיטת ה- Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta} המחקר בעבודה זו נעשה בגביש $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ המחקר בעבודה זו נעשה בגביש (37] method (27) אינטו-אופטיות. הדגם נחתך (27) אינטו-אופטיות. הדגם נחתך (27) אינטו-אופטיות. הדגם ממדי הדגם במשטח לא הם 10m x 2.3mm (28) אינטו-אופטיות (28) אינטו לידינו לממדים הרצויים. ממדי הדגם במשטח לש הם Ab הם 10m x 2.3mm (28) אינטו-אופטיות (28) אינטו-אופטיות (28) אינטו-אופטיות (28) אינטו-אופטיות (28) אינטו (28)

מקומי בדגם, בתנאי שכוחות הלכידה משתנים בהתאם. בכדי ליצור שני אזורים בעלי כוחות לכידה שונים בדגם, כיסינו את חציו של הדגם במסכת נחושת בעובי של 5mm, בלתי חדירה להקרנה של יונים כבדים. בצורה כזו, חלקו המכוסה של הדגם אינו מושפע מההקרנה, ואילו חלקו השני חשוף להקרנה האנרגטית ומושפע ממנה. איור 3.5 מציג תמונה של הדגם כפי שנשלח להקרנה, ותמונה סכמתית של הדגם לאחר ההקרנה.



איור 4/6 (a) הדגם מכוסה במסכת נחושת- כך שרק חלקו חשוף להקרנה*ו* לאחר ההקרנה מתקבל האיר ההקרנה מתקבל המנקבל (b).

ההקרנה ביונים כבדים יצרה פגמים גליליים (columnar defects) לאורך ציר c, כפי שהוזכר (GSI) בפרק הקודם. הדגם הוקרן ביוני זהב אנרגטיים (2.2 GeV), בדרמשטד, גרמניה (GSI). לפני ההקרנה הדגם עבר מדידות על מנת לוודא כי התפלגות השטף המגנטי בו "סטנדרטית". פגמים גליליים נוצרים כאשר יונים כבדים הורסים את המבנה הגבישי, במסלול בו הם עוברים פגמים גליליים נוצרים כאשר יונים כבדים הורסים את המבנה הגבישי, במסלול בו הם עוברים הרך הדגם. השימוש באנרגיות גבוהות ויונים כבדים, יוצר נזק בדגם לאורך מסלול גלילי. דרך הדגם השימוש באנרגיות גבוהות ויונים כבדים, יוצר ניוק בדגם לאורך מסלול גלילי. הפגמים גליליים שנוצרו בדגם, הם בקוטר של חוד 7, לאורך עובי הדגם [38]. מכיוון הפגמים הגליליים שנוצרו בדגם, הם בקוטר של חוד 7, לאורך עובי הדגם [38]. מכיוון שלפגמים גליליים שנוצרו בדגם, הם בקוטר של חוד 7, לאורך עובי הדגם [38]. מכיוון הפגמים הגליליים שנוצרו בדגם, הם בקוטר של חוד 7, לאורך עובי הדגם גם פיפות הפגמים הגליליים שנוצרו בדגם, הם בקוטר של חוד 7, לאורך עובי הדגם גם פיפות ההקרנה קובעת את צפיפות ההקרנה, נמדדת במונחים של שדה מגנטי. לכל מינון הקרנה ישנו שדה מתאים, field שלפגמים. ככל ההקרנה, נמדדת במונחים של שדה מגנטי. לכל מינון הקרנה ישנו שדה מתאים, field שצפיפות ההקרנה, נמדדת במונחים של שדה מגנטי. לכל מינון הקרנה ישנו שדה מתאים, field שצפיפות ההקרנה, נמדדת במונחים של שדה מגנטי. לכל מינון הקרנה בדגם מקווי שטף שנלכדו בפגמים. ככל הינש ההקרנה עולה מספר הפגמים גדל, ובהתאם לכך ה-matching הממוצע בין הפגמים הוא זו נעשה בדגם במינון נמוך של 80 גאוס. במינון זה המרחק הממוצע בין הפגמים הוא מום -0.5 שמחקר מתוק הממוצע בין הפגמים הוא הוא מינון הקשר הישנים הוא גודלה של המים הוא המרחק הממוצע בין הממוצע בין המחקר מוא שנים -0.5 שנים הוא גודלה של הינה איס. במינון זה המרחק הממוצע בין המחקר בעבודה מוו נעשה בדגם במינון נמוך של 80 גאוס. במינון זה המרחק הממוצע בין הממוצע בין הנגמים הוא מינו הוא שנית מוו -0.5 שנים הוא גודלה מוו -0.5 שנים הוא

18

פרק 5. תוצאות

איסוף הנתונים בעבודה זו נעשה באמצעות הדמיה מגנטו-אופטית של התפלגות האינדוקציה בדגם $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ החצי מוקרן. מהלך ההדמיה התבצעה בנוכחות שדה מגנטי עולה, H_{ext} , בקצבי סריקה, $\frac{dH_{ext}}{dt}$, שונים, בתחומי הטמפרטורות H_{ext} , לאורך כל H_{ext} , עולה, בקצבי סריקה, אורק כל המדידות השדה החיצוני, מופעל בכיוון ציר c. מתוך הדמיות אלו אנו יוצרים לולאות מגנטיזציה לוקאליות, M(B). לולאות לוקאליות אלו נלקחו באזורים שונים בדגם, הנבדלים בכוחות לכידה ובמקור הזרקת המצבים הטרנזיינטים לאזורים אלו. מתוך לולאות המגנטיזציה הלוקאליות נוכל לחלץ פרמטרים שונים, אשר באמצעותם נבין את השפעת ההקרנה על התנהגות שריג הפלקסונים באזור מעבר הפאזה סדר – אי-סדר. בסעיפים הבאים אנו מתארים את התהליד שבסופו נוכל לאפיין שני גורמים עיקריים. הראשון הוא, השפעת ההקרנה על דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים, אותו אנו נוציא מתוך השוואה בין נקודה באזור המוקרן ונקודה באזור הלא מוקרן. שתי נקודות אלו מרוחקות משפות הדגם במרחק שווה, קרוב לשפות, כך שהזרקת המצבים הטרנזיינטים לשני האזורים נעשית דרך השפה. הגורם השני אותו נרצה לאפיין הוא תפקידו של פנים הדגם (bulk) ביצירת המצבים הטרנזיינטים, אותו נוציא מתוך מדידות בנקודות באזור המוקרן ליד הממשק בין האזורים, כך שהמצבים הטרנזיינטים מוזרקים מהאזור הלא מוקרן לנקודות אלה. בסעיף הבא נתאר כיצד חודר שטף מגנטי בדגם החצי מוקרן, כאשר הוא מצוי בנוכחות שדה מגנטי חיצוני עולה.

5/2 חדירת שטף מגנטי בו זמנית לאזור המוקרן והלא מוקרן

הדמיה מגנטו אופטית מאפשרת לראות את מהלך חדירת השטף המגנטי לתוך הדגם. חדירת השטף נעשית כחזית אחידה לאורכו של הדגם, הנעה לרוחב הדגם מקצותיו לכיוון מרכזו. איור 4.1 מתאר הדמיה מגנטו-אופטית של הדגם החצי מוקרן, בטמפרטורה של 26K כאשר השדה החיצוני הגיע ל- 300 Oe בקצב קבוע של Oe/sec 40 00. מתוך תמונה זו ניתן לראות בברור את ההבדל בהתפלגות השטף המגנטי שחדר לאזור המוקרן ולאזור הלא מוקרן שבדגם. אנו רואים כי באזור הלא מוקרן חדירת השטף המגנטי ניתן לראות חדירה של שטף מגנטי לאזור המוקרן דרך הממשק (interface) שבין האזור המוקרן והלא מוקרן. השוני במהירות חדירת השטף באזורים השונים, נובע מההבדל בכוחות הלכידה שבין האזורים, כתוצאה מחשיפת חצי הדגם בלבד להקרנה [30]. בגלל השוני במהירות חדירת השטף המגנטי, משפות הדגם, לאזורים השונים, נוצר מצב שבו שטף מגנטי חודר לאזור המוקרן מהאזור הלא מוקרן, בממשק שבין האזור שהוקרן לזה שלא הוקרן.



במקרים מסוימים, הדמיה מגנטו-אופטית מאפשרת לאתר את כניסתו והתקדמותו של המצב הטרנזיינטי בדגם. במקרים אלה, נבחין בשינוי ברור בגרדיאנט התפלגות האינדוקציה. לעומת זאת, פרופיל האינדוקציה החד ממדי המתפתח עם הזמן, (*B*(*x*,*t*), מראה בברור את כניסתו של המצב הטרנזיינטי. איור 4.2 מציג את התפתחות פרופיל האינדוקציה המגנטית, שנלקח באזור הממוסגר שבאיור 4.1. כל פרופיל הוא חתך חד ממדי לרוחב הדגם, וגובהו מציין את התפלגות האינדוקציה המגנטית בדגם ברגע נתון. חדירת המצב הטרנזיינטי, מתבטא בשינוי פתאומי וברור בשיפוע של פרופיל האינדוקציה. לנקודה המפרידה בין השיפועים השונים שעל פרופיל האינדוקציה אנו קוראים *יישבריי* בפרופיל האינדוקציה.

21



איור 5/3/ פרופיל של האינדוקציה המתפתחת בזמן- כפונקציה של המיקום- B(x,t)- שנלקחו עבור האזור הממוסגר שבאיור 5/2/ הקו המקווקו מציין את הממשק שבין האזורים; (a) מוקרן ו. (b) הלא מוקרן/ על פרופיל האינדוקציה מסומן בעיגול השינוי בשיפוע הפרופיל *#שבר#(- באינדוקציה של כ. 411 גאוס באזור (b) ובאינדוקציה של כ. 361 גאוס באזור (b)

(a) מתוך איור 4.2 ניתן לראות את השוני בהתפתחות האינדוקציה שבין האזור המוקרן , אזור (a) ובין האזור הלא מוקרן , אזור (b). בעוד שהשטף המגנטי חודר לאזור הלא מוקרן אזור (b). בעוד שהשטף המגנטי חודר לאזור הלא מוקרן אזור (b) בעוד הממשק שנוצר כתוצאה מההקרנה, בנוסף לזה שחודר שטף מגנטי חודר לאזור המוקרן דרך הממשק שנוצר כתוצאה מההקרנה, בנוסף לזה שחודר משפת הדגם. האזור המוקרן מראה פרופילי אינדוקציה בעלי שיפוע גדול מאלו שבאזור הלא משפת הדגם. האזור המוקרן מראה פרופילי אינדוקציה בעלי שיפוע גדול מאלו שבאזור הלא מוקרן, דבר המעיד כי באזור המוקרן קיים זרם מתמיד גבוה יותר מזה שבאזור הלא מוקרן, המוקרן, דבר המעיד כי באזור המוקרן קיים זרם מתמיד גבוה יותר מזה שבאזור הלא מוקרן, המעיד על קיומה של פאזה לא מסודרת במערך הפלקסונים [39]. שוני נוסף בין האזורים, הוא המעיד על קיומה של פאזה לא מסודרת במערך הפלקסונים [39]. שוני נוסף בין האזורים, הוא המעיד על קיומה של פאזה לא מסודרת במערך הפלקסונים [39]. שוני נוסף בין האזורים, הוא המעיד על קיומה של פאזה לא מסודרת במערך הפלקסונים [39]. שוני נוסף בין האזורים, הוא המעיד על קיומה של פאזה לא מסודרת במערך הפלקסונים [30]. שוני נוסף בין האזורים, הוא המעיד על קיומה של פרופיל האינדוקציה גבוהה יותר מזו שבאזור המוקרן היערך האינדוקציה. השבר באזור הלא מוקרן מופיע באינדוקציה גבוהה יותר מזו שבאזור המוקרן ונראה ברור יותר באזור הלא מוקרן. לעיתים קשה להבחין בשבר, ולכן מתוך התפתחות פרופיל האינדוקציה, קשה לעיתים לבצע השוואה כמותית שתאפשר את אפיון התנהגות מערך הפינקסונים בין האזורים. השוואה כמותית טובה, העונה לצרכי מחקר זה, תינתן באמצעות הפלקסונים בין האזורים. השוואה כמותית טובה, העונה לצרכי מחקר זה, תינתן באמצעות הפלקסונים בין האזורים. השוואה כמותית טובה, העונה לצרכי מחקר זה, תינתו בסטיות הינקסויות מגנטיזציה לוקאליות (M(B) ו-M(B) שניצור מתוך ההדמיות המגנטו-אופטיות הפלקסונים בין האזורים. בסעיף הבא אנו נתאר כיצד התפתחות פרופיל האינדוקציה בא עדי ביטוי ביטוי ביטויות מגנטיזציה הלוקאליות. בסעיף הבא אנו נתאר כיצד התפתחות פרופיל האינדוקציה בא לידי ביטוי ביטוי ביטויות המגנטיזציה הלוקאליות (Bיין ביטויות המגנטיזציה הוות. בסעיף הבא אנו נתאר כיצד התפתחות היינקסוית היינקוקציה בא מגנטיזציה היינקוים מגנטיזציה היינקסוים מגנטיו

22

<u>5/3 עקומות מגנטיזציה לוקאליות ופרופיל האינדוקציה</u>

את עקומות המגנטיזציה הלוקאליות אנו מוציאים מתוך ההדמיה המגנטו אופטית, כפי שתואר בפרק 3 שעסק במערכת הניסוי. בסעיף זה נציג שני סוגים של עקומות מגנטיזציה לוקאלית. בפרק 5 שעסק במערכת הניסוי. בסעיף זה נציג שני סוגים של עקומות מגנטיזציה לוקאלית. האחד M(H) והשני M(B). כפי שיפורט בהמשך ובפרק הבא, אופן ניתוח הנתונים, העונה לצרכי מחקר זה, יאפשר התייחסות זהה לעקומות אלה. איור 4.3 מציג מדידות של עקומות מגנטיזציה לנצרכי מחקר זה, יאפשר התייחסות זהה לעקומות שלה. איור 5.4 מציג מדידות של עקומות מגנטיזציה לנצרכי מחקר זה, יאפשר התייחסות זהה לעקומות אלה. איור 5.4 מציג מדידות של עקומות בוצעה בנוכחות שדה חיצוני העולה בקצב קבוע של Oe/sec 20 Oe/sec בטמפרטורה של 10.



איור 5/4 עקומות מגנטיזציה לוקאליות כפונקציה של השדה החיצוני, העקומות נלקחו בנקודות שונות איור 5/4 איור 5/4 עקומות מגנטיזציה לוקאליות כפונקציה שדה החיצוני עולה- בקצב של 20Oe שנייה שדה ה. בדגם החצי מוקרן בטמפרטורה של26- בנוכחות שדה חיצוני עולה- בקצב של H_{smp} מופיע באזור ה. 461 גאוס- ואינו מראה תלות במיקום- לעומת שיאו- H_{smp}

אוא שדה ה-onset של תופעת השיא השני שני הקפיצה שעל עקומת המגנטיזציה, בין הוא שדה ה-m_{onset onset onset הוא שדה ה- m_{smp} ו הוא שדה ה m_{smp} , מתורגמת בעלייה פתאומית בזרם המתמיד שכן m_{onset} , מתורגמת בעלייה משדה המעבר התרמודינמי, פרופיל האינדוקציה המופיע לראשונה באינדוקציה, הנמוכה הנמוכה סי

 B_{od} , מעיד אף הוא על עלייה פתאומית בזרם המתמיד. נציין, כי כאשר מדובר בסריקת שדה B_{od} , מעיד אף הוא על האשנה ליד שפות הדגם [7], וסמוך לשפת הדגם האינדוקציה שווה לערכו שולה, השבר מופיע לראשונה ליד שפות הדגם [7], וסמוך לשפת הדגם האינדוקציה שווה לערכו של השדה החיצוני [40], מכאן ש- B_{f0} . כאשר B_{f0} מסמן את האינדוקציה בה חדרה לדגם חזית השטף הטרנזיינטי הלא מסודר לראשונה. ערכו של ממיור איפא, על האינד השטף הטרנזיינטי הלא מסודר לראשונה. ערכו של ממיור איפא, על האינדוקציה בה נכנס המצב הטרנזיינטי לדגם. מהאמור לעיל ומאיור 4.3 עולה, כי עבור קצב האינדוקציה בה נכנס המצב הטרנזיינטי לדגם. מהאמור לעיל ומאיור 4.3 עולה, כי עבור קצם סריקת שדה מסוים, H_{onset} אינו *תלוי במיקום* בו נלקחה עקומת המגנטיזציה הלוקאלית. לעומתו, שדה השיא השני, g_{mst} , תלוי במיקום בו נמדדה עקומת המגנטיזציה. קוא הוא לעומתו, שדה השיה השני, H_{onset} , תלוי במיקום בו נמדדה עקומת המגנטיזציה הלוקאלית. השדה שבה קיים הזרם הקריטי הגבוה ביותר עבור נקודה מסוימת, הבא לידי ביטוי בהגעתו של השבה שבה קיים הזרם הקריטי הגוה 4.4 מציג סכמתית כיצד כניסתו של השבר ב-השדה שבה לידות המדידה. איור 4.4 מציג סכמתית כיצד כניסתו של השבר ב-גודלו של הזרם המתמיד בנקודה, הפרופורציוני למגנטיזציה. עד להגעתו של השבר לנקודת המדידה, היור 5.4 מציג סכמתית כיצד כניסתו של השבר ה-מסוימת את של השבר ב-מחדיה. איור 4.4 מציג סכמתית כיצד כניסתו של השבר נקודת המדידה, היור 5.4 מציג סכמתית כיצד כניסתו של השבר ה-מסוימי את המדידה, הזרם המתמיד בנקודה זו, נמוך. הגעת השבר לנקודה, ב-מחדיה את הזרם המתמיד בנקודה זו, נמוך. הגעת השבר לנקודה, ב-מחדיה את הזרם המתמיד, בנקודה זו, נמוך. הגעת השבר לנקודה, ב-מחדיה את הזרם המתמיד, בנקודה זו, נמוך. הגעת השבר לנקודה, ב-מחדיה את הזרם המתמיד בנקודה זו, נמוך. הגעת השבר לנקודה, ב-מחדיה את הזרם המתמיד, בנקודה זו, מתמיד בנקודה זו, נמוך. הגעת השבר לנקודה, ב-מחדיה את הזרם המתמיד, בנקודה זו, נמוך. הגעת השבר לנקודה, ב-מחדיה את הזרם המתמיד בנקודה זותר.



 $H_{onset} = B_{f0}$ התקדמות הדגם- כאשר $H_{onset} = B_{f0}$ איור 5/5, התקדמות הדגם- כאשר H_{smp} איור 5/5, התקדמות המדידה- השדה החיצוני הוא - H_{smp} ברגע זה- בנקודת המדידה- השדה החיצוני הוא והזרם גבוה/

אופי הניתוח בעבודה זו, מאפשר לקבל עקומות מגנטיזציה, ליד שפות הדגם. במקרה כזה ניתן אופי הניתוח בעבודה זו, מאפשר לקבל עקומות המגנטיזציה הלוקאליות התלויות באינדוקציה, להמשיך את איסוף הנתונים, מתוך עקומות המגנטיזציה הלוקאליות התלויות באינדוקציה, M(B). איור 4.5 מציג עקומת מגנטיזציה לוקאלית , M(B), של הדגם החצי מוקרן, שנמדדו באותם תנאים בהם נמדדו עקומות המגנטיזציה (H), שבאיור 4.3. עקומה זו, נמדדה קרוב לשפות הדגם.



איור 5/6/ עקומת מגנטיזציה לוקאלית- שנמדדה קרוב לשפות הדגם- עליה מצוינים מאפייני עקומת איור 5/6/ עקומת מגנטיזציה לה H_{onset} ו. B_{onset} ואוס- זהה לערכו של B_{onset} הנמדד באותם תנאים.

 H_{onset} - ניתן לראות כי כאשר הנקודה הנמדדת קרובה לקצה הדגם, B_{onset} ב-M(B) תואם ל שהתקבל ב-M(H). יתרה מכך, גם B_{onset} מציג אי תלות במקום, עבור סדרה של מדידות ליד שהתקבל ב-M(B). יתרה מכך, גם B_{onset} איור 4.6 מציג עקומות מגנטיזציה לוקאלית, M(B), שפת הדגם. כלומר M(B) בטמפרטור 4.6 מציג עקומות מגנטיזציה לוקאלית, שפת הדגם. כלומר שידה חיצוני העולה בקצב קבוע של 20 Oe/sec, בטמפרטורה של הדגם החצי מוקרן, בנוכחות שדה חיצוני העולה בקצב קבוע של 20 Oe/sec, בטמפרטורה של 26K.



אויר 7/7 עקומות מגנטיזציה לוקאליות שנלקחו במקומות שונים בדגם/ העקומות נלקחו בנוכחות שדה מגנטי חיצוני העולה בקצב קבוע של Oe/sec - בטמפרטורה של 26K/ ניתן לראות כי שדה ה. onset אינו תלוי במיקום- בעוד ששדה השיא השני תלוי במיקום/

המעבר לעקומות מגנטיזציה לוקאליות כפונקציה של האינדוקציה, טבעי יותר כאשר מדובר B(x,t). B(x,t) במדידות מגנטו אופטיות מהן ניתן לקבל את פרופיל האינדוקציה המתפתח בזמן, B(x,t). חשוב לציין, כי פרופיל האינדוקציה מציג את התפתחות האינדוקציה לרוחבו של כל הדגם, חשוב לציין, כי פרופיל האינדוקציה מציג את התפתחות האינדוקציה לרוחבו של כל הדגם, עבור חתך חד ממדי. לעומתו, עקומת המגנטיזציה הלוקאלית, מתארת נקודה אחת על פרופיל האינדוקציה. איור 1.7 ממחיש את הקשר בין פרופיל האינדוקציה לעקומת המגנטיזציה המתיד אחת על פרופיל האינדוקציה. איור 1.7 ממחיש את הקשר בין פרופיל האינדוקציה לעקומת המגנטיזציה המתאימה הלוקאלית. האיור מציג תמונת פרופיל המתפתח עם הזמן, ואת עקומת המגנטיזציה המתאימה למיקום מסוים בפרופיל. בתמונות אלה מצוינות שתי נקודות. הנקודה האדומה, מציינת את האינדוקציה בה מופיע השבר, B_{f0} , בתמונת הפרופיל, הבאה לידי ביטוי כ- B_{onset} לעקומת המגנטיזציה המגנטיזציה המגנטיזציה המתאימה המגנטיזציה הלוקאלית. הנקודה הירוקה, מציינת את המגנטיזציה הלוקאלית. הנקודה המתאימה המגנטיזציה המתאימה מסוים בפרופיל. בתמונות אלה מצוינות את הפרופיל, הבאה לידי ביטוי כ- געינת את האינדוקציה בה מופיע השבר, הנקודה הירוקה, מציינת את המגנטיזציה הלוקאלית. הנקודה הירוקה, מציינת את האינדוקציה בה מגיע השבר לנקודה בה מגנטיזציה המתאימה.





איור 5/8/ הקשר בין פרופיל האינדוקציה ועקומת המגנטיזציה הלוקאלית/ האיור העליון מתאר את פרופיל האינדוקציה/ הנקודה האדומה מכסה את השבר שעל פרופיל האינדוקציה/ הנקודה הירוקה היא הנקודה הלוקאלית בה נמדדה עקומת המגנטיזציה שבאיור התחתון/ באיור התחתון ניתן לראות כי שדה ה. onset קשור להופעתו של השבר על פרופיל האינדוקציה- ולא למיקום בו נמדדה העקומה/

ל- B_{f0} והוא העובדה ה - כפי שנראה בהמשך, בעבודה זו אנו מנצלים את העובדה כי שדה ה B_{f0} והוא אינו תלוי במקום המדידה. בסעיף הבא אנו מראים כיצד נראות עקומות המגנטיזציה הלוקאליות באזור המוקרן והלא מוקרן.

5/4 עקומות מגנטיזציה לוקאליות ליד שפות הדגם

בכדי לאפיין את השפעת ההקרנה על דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים של מערך הפלקסונים, ייצרנו עקומות מגנטיזציה לוקאליות באזור המוקרן והלא מוקרן, במרחק שווה משפת הדגם עבור כל אזור. איור 4.8 מתאר את הדגם, ועליו הנקודות ממנו נלקחו עקומות המגנטיזציה.



איור 75/9 איור סכמתי של הדגם המוקרן בחלקו- עליו מסומנות הנקודות- בכחול ובאדום- בהן נמדדו עקומות המגנטיזציה הלוקאליות/ שתי הנקודות נמצאות במרחק של mm 0.2 משפות הדגם/ השדה החיצוני נמדד רחוק מהדגם/

המדידה בנקודות אלה מבטיחה כי מקור השטף עבור שני האזורים הינו מחוץ לדגם. יחד עם זאת, נקודות המדידה מרוחקות מספיק משפת הדגם, כך שאנו נמנעים מהשפעות של זרמי שפה [41,42]. איור 4.9 מציג את עקומות המגנטיזציה שנלקחו בנקודות אלה, כאשר הדגם קורר לטמפרטורה של 30K, ונמצא בנוכחות שדה מגנטי חיצוני העולה בקצב קבוע של 20 Oe/sec.

28



איור 5.5 עקומות מגנטיזציה לוקאליות שנלקחה ב. T=30K כאשר השדה החיצוני עולה בקצב של 31 גאוס לשנייה/ העקומות נלקחו באותו זמן ובנקודה הנמצאת במרחק שווה של 0.2 mm מקצות הדגם באזור המוקרן יבאדום(ובאזור הלא מוקרן יכחול//

מאפייני לולאת המגנטיזציה שבאזור המוקרן שונים מאלו שבאזור הלא מוקרן. B_{onset} באזור המוקרן קטן מזה שבאזור הלא מוקרן, מה שמעיד כי המצב הטרנזיינטי באזור המוקרן מופיע המוקרן קטן מזה שבאזור הלא מוקרן, מה שמעיד כי המצב הטרנזיינטי באזור המוקרן מופיע באינדוקציות נמוכות מזה שבאזור הלא מוקרן. בנוסף, באזור הלא מוקרן ניתן לראות כי המעבר בין B_{onset} ל- B_{onset} חד מאד ביחס לאותו מעבר באזור המוקרן ומראה קפיצה אנומלית המעבר בין היתר של הירם המתמיד ($m_{onset} \rightarrow m_{smp}$), וכאמור מעיד על שינוי ברור יותר של שיפוע גדולה יותר של הזרם המתמיד ($m_{onset} \rightarrow m_{smp}$), וכאמור מעיד על שינוי ברור יותר של שיפוע הרפיצה אינומלית פרופיל האינדוקציה. הבדלים אלה שיוסברו בהמשך, מעידים על שוני בדינאמיקה של המצבים הטרנזיינטים באזור המוקרן והלא מוקרן. אנו מנצלים את העקומות הלוקאליות בכדי לערוך השוואה כמותית באזורים השונים, עבור הדינאמיקה של מערך הפלקסונים. בכדי ליצור השוואה כמותית באזורים השונים, של פרמטרים כמו זמן חיים ושדה המעבר, נתבונן השוואות כמותיות בין שני האזורים, של פרמטרים כמו זמן חיים ושדה המעבר, נתבונן העוואות מגנטיזציה שנלקחו בקצב עליית שדה שונים, סריקת שדה עולה (field sweep up), אור כל אזור בנפרד.

5/5 עקומות מגנטיזציה לוקאליות בקצבי סריקת שדה שונים

כאשר מוזרקים מצבים טרנזיינטים לא מסודרים אנו מצפים כי מאפייני לולאת המגנטיזציה, כאשר מוזרקים מצבים טרנזיינטים לא מסודרים אנו B_{smp} ו- B_{onset} ו- B_{onset}

סדרה של עקומות מגנטיזציה לוקאליות, המובדלות זו מזו בקצב בו משתנה השדה החיצוני,

. באיור בקצבי סריקה שונים 4.10(b) ו- 4.10(a) באיור . $\frac{dH_{ext}}{dt}$

dH_{ext}/dt T=30K Oe/sec 0 2.5 5 7.5 10 M(G) 20 40 -60 80 B_{onset} · 160 320 B_{smp} -120 0 200 400 600 800 **B(G)** 5/21 (a) איור dH/dt T=30K 0 (Oe/sec) 2.5 5 7.5 10 20 -70 40

בטמפרטורה של 30K, עבור האזור הלא מוקרן והמוקרן בהתאמה.



(a) איור 5/21 סדרת עקומות מגנטיזציה שנלקחו בטמפרטורה של 30 K בשתי נקודות שונות בדגם/ באזור הלא מוקרן (a) איור 5/21 סדרת עקומות מגנטיזציה שנלקחו בטמפרטורה של 30 K בשתי נקודות שונות בדגם/ סדרת עקומות מוא ובאזור המוקרן (b) במרחק של 0.2 mm ובאזור המוקרנת והמוקרנת בהתאמה/ השוני בין כל עקומה הוא בקצב סריקת השדה החיצוני בטווחים שבין 2.5 Oe/sec ל.

מאפייני לולאת המגנטיזציה, B_{onset} ו- B_{onset} , מונמכים עם הקטנת חלון הזמן של המדידה מאפייני לולאת המגנטיזציה, B_{onset} ו- B_{onset} , מונמכים עם הקטנת חלון הזמן של המדידה כלומר, ככל שהשדה החיצוני משתנה בקצב קבוע גבוה יותר. היימריחהיי באינדוקציה שבין מאפיינים אלה הולכת וגדלה ככל שקצב סריקת השדה גדל, וכך גם הקפיצה האנומלית בזרם המתמיד. B_{onset} גדלה ככל שקצב סריקת השדה גדל, וכך גם הקפיצה האנומלית בזרם המתמיד. B_{onset} וגדלה ככל שקצב סריקת השדה גדל, וכך גם הקפיצה האנומלית בזרם המתמיד. המתמיד. אלה הולכת וגדלה ככל שקצם סריקת השדה בחלון זמן המדידה מאשר המשר המתמיד. המתמיד. המתמיד. הלא מוקרן, תלוי הרבה פחות בחלון זמן המדידה מאשר המשר המוקרן שבאזור המוקרן המוקרן. איור 111 מציג את תלותו של שדה ה



איור 5/22 תלותו של B_{onset} בקצב גידולו של השדה החיצוני/ תלותו של B_{onset} באזור המוקרן יעקומה איור 5/22 תלותו של השדה החיצוני/ תלותו של המוקרן יעקומה תחתונה (חזק מזה שבאזור הלא מוקרן/ שדות ה. onset נלקחו מתוך עקומות מגנטיזציה- שנמדדו ליד שפות הדגם הטבעיות- לאחר שקורר ל. 30K/

ניתן לראות, כי עם הארכת חלון זמן המדידה (הקטנת קצב גידולו של השדה החיצוני), שדה ה - ניתן לראות, כי עם הארכת חלון זמן המדידה (הקטנת קצב גידולו של השדה החיצוני), שדה ה B_{onset} אינו תלוי בזמן, onset onset שואף לערכו התרמודינמי של שדה המעבר, B_{od} . כאמור, כאשר B_{onset} אינו תלוי בזמן, הוא בעצם שדה המעבר התרמודינמי סדר – אי-סדר, B_{od} . בפרק הבא נראה כיצד אנו מנצלים הוא בעצם שדה המעבר התרמודינמי סדר – אי-סדר, אי-סדר, ומתן בפרק הבא נראה כיצד אנו מנצלים את תלותו של שדה ה – onset סופר המרמודינמי סדר – אי-סדר, ומתן המגנטיזציה לעיל, את תלותו של שדה ה – onset בחלון זמן המדידה בכדי לחלץ מתוך עקומות המגנטיזציה לעיל, פרמטרים מהם אנו למדים על השפעתה של ההקרנה על דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים. כאמור, בנוסף לשאלה העוסקת בהשפעת ההקרנה, אנו מנצלים את הממשק בדגם החצי מוקרן, על מנת לבחון את תפקידו של פנים הדגם (bulk) ביצירתם של מצבים טרנזיינטים. בסעיפים הבאים אנו מראים את תוצאות המדידה של נקודות הסמוכות לממשק שבין האזור המוקרן והלא מוקרן הנוצר כתוצאה מההקרנה.

<u>אבול ההקרנה 5/6 אדירת שטף מגנטי דרד גבול ההקרנה</u>

הקרנת הדגם בחלקו יוצרת מצב בו ניתן להזריק, שטף מגנטי לאזור המוקרן מתוך האזור הלא מוקרן בנוסף לזה המוזרק משפות הדגם. במקרה כזה אזור הממשק המפריד בין האזורים משמש כ״שפה״ עבור האזור המוקרן, ולהלן תיקרא ״שפה מלאכותית״. אנו מתייחסים לאזור הממשק כ״שפה״ עבור האזור המוקרן, ולהלן תיקרא ״שפה מלאכותית״. אנו מתייחסים לאזור הממשק כ״שפה״ עבור האזור המוקרן, ולהלן תיקרא ״שפה מלאכותית״. אנו מתייחסים לאזור הממשק כ״שפה״ עבור האזור המוקרן, ולהלן תיקרא ״שפה מלאכותית״. אנו מתייחסים לאזור הממשק כ״שפה״ עבור האזור המוקרן, ולהלן תיקרא שטף דרכו, מכיוונו של האזור הלא מוקרן לאזור הממשק כשפה מלאכותית, משום הזרקה של שטף דרכו, מכיוונו של האזור הלא מוקרן לאזור הממשק כשפה מלאכותית, משום הזרקה של שטף דרכו, מכיוונו של האזור הלא מוקרן ליאזר המוקרן. על תפקודו של ממשק זה כשפה, נדון בהמשך. בכדי לייצר עקומות מגנטיזציה לוקאליות עבור נקודות ליד השפה המלאכותית, אנו לוקחים בחשבון כי השדה החיצוני וקצב גידולו, עבור נקודות אלה, היא התפתחות האינדוקציה באזור הלא מוקרן ליד השפה המלאכותית, בשונה מנקודות לוקאליות ליד שפות הדגם הטבעיות, בהן השדה החיצוני וגידולו אינו תלוי בדגם. קצב גידול האינדוקציה באזור המוקרן אינו קבוע שכן הוא תלוי בקצב עליית השדה החיצוני ומצבים הטרנזיינטים שהוזרקו לאזור זה. איור 1.2 מראה את התפתחותה של האינדוקציה בזמן באזור הלא מוקרן בדגם, שקורר לטמפרטורה של 4.12 הואו נמצא בנוכחות האינדוקציה בזמן באזור הלא מוקרן בדגם, שקורר לטמפרטורה של 20 או מנטי המשתנה בקצב קבוע של 20 ספ.



איור 5/23 התפתחות האינדוקציה המגנטית בזמן באזור הלא מוקרן- כאשר הדגם נמצא ב. 26K ובנוכחות איור 5/23 התפתחות האינדוקציה המגנטית בזמן באזור הלא מוקרן- כאשר הדגם נמצא ב.

הזמן הוא $-B_{onset}$ - האינדוקציה מתפתחת לדגס/ עד ל. האינדוקציה מתפתחת - B_{onset} הזמן הוא בקצב קבוע

ניתן לראות כי עד לאינדוקציה בה חדרו מצבים טרנזיינטים, B_{onset} , האינדוקציה בדגם גדלה ניתן לראות כי עד לאינדוקציה בה חדרו מצבים טרנזיינטים, B_{onset} , השדה החיצוני וקצב גידולו בקצב קבוע. לכן ניתן לומר כי עד ל B_{onset} של האזור הלא מוקרן, השדה החיצוני וקצב גידולו עבור נקודות באזור המוקרן קבוע ומצבים טרנזיינטים אינם מוזרקים לאזור המוקרן. איור 4.13 מראה את פרופיל האינדוקציה המתפתח עם הזמן באזור הלא מוקרן והמוקרן בו זמנית. 4.13 מתוך איור זה ניתן לראות כי עד להופעתו של השבר באזור הלא מוקרן המוקרן בו זמנית. מתוך איור זה ניתן לראות כי עד להופעתו של השבר באזור הלא מוקרן, שיפוע הפרופיל נמוך מתוך איור זה ניתן לראות כי עד להופעתו של השבר באזור הלא מוקרן, שיפוע הפרופיל נמוך מתוך איור זה ניתן לראות כי עד להופעתו של השבר באזור הלא מוקרן, שיפוע הפרופיל נמוך מאד, מה שמעיד כי השטף המוזרק לאזור המוקרן נמצא במצב מסודר. במעבר לאזור המוקרן מאדר, דרך הממשק, שיפוע הפרופיל הופך לחד יותר, מה שמעיד כי השטף באזור המוקרן הופך ללא מסודר.



איור 5/24 פרופיל האינדוקציה המגנטית באזור השפה המלאכותית/ הקו המקווקו מציין את השפה המלאכותית-המפרידה בין האזור המוקרן ימימין(והאזור הלא מוקרן ימשמאל// השבר באזור המוקרן מופיע באינדוקציות נמוכות מזה שבאזור הלא מוקרן/ שיפוע הפרופיל משתנה באופן דרמתי- במעבר של שטף דרך הממשק שבין האזור המוקרן והלא מוקרן/

הופעתו של המצב הטרנזיינטי באזור המוקרן באינדוקציה נמוכה מזו שבאזור הלא מוקרן מאפשרת את ״תפיסת״ המצב הטרנזיינטי באזור המוקרן, בטרם חדרו מצבים טרנזיינטים לאזור הלא מוקרן. ניתן לראות מאיור 4.13 ,כי את השבר באזור המוקרן ליד השפה המלאכותית, קשה לזהות מתוך תמונת הפרופיל, לכן גם במקרה זה נעשה שימוש בעקומות המגנטיזציה על מנת לקבל הערכה כמותית טובה. בכדי לאפיין את דינאמיקת שריג הפלקסונים באזור המוקרן ליד הממשק, אנו מייצרים עקומות מגנטיזציה לוקאליות, כך שקצב גידולו של השדה החיצוני הוא קצב גידולה של האינדוקציה באזור הלא מוקרן. מתוך עקומות המגנטיזציה הלוקאליות, אנו מוצאים את אותם פרמטרים שהוצאנו עבור הזרקה משפות הדגם הטבעיות ובאותו אופן. בכך נוכל לאפיין את תפקידו של פנים הדגם (bulk) בדינאמיקת המצבים הטרנזיינטים. בסעיף הבא נראה עקומות מגנטיזציה לוקאליות בקצבי סריקה שונים באזור המוקרן, ליד הממשק.

5/7 עקומות מגנטיזציה לוקאליות באזור המוקרן שליד הממשק

איור 4.14 מציג את הנקודה באזור המוקרן שליד הממשק, בה נמדדה עקומת המגנטיזציה, ואת הנקודה ממנה נמדד, מה שמציין את השדה החיצוני.



איור 5/25/ תיאור סכמאתי של הנקודה הלוקאלית- בה נמדדה עקומת המגנטיזציה ינקודה אדומה{- באזור המוקרן סמוך לשפה המלאכותית/ ניתן לראות כי כעת הנקודה ממנה נמדד השדה החיצוני- עבור האזור המוקרן- ממוקם באזור המוקרן- שכן מקור השטף עבור הנקודה האדומה וסביבתה- מגיע מהאזור המוקרן/

גם במקרה זה הנקודה נלקחה במרחק המבטיח כי השטף המגיע לנקודה, מקורו מהמעבר דרך השפה המלאכותית. מיקום הנקודות רחוקות מספיק מהשפה המלאכותית, על מנת למנוע השפעות של זרמים חזקים הנוצרים באזור הממשק. איור 4.15 מציג עקומות מגנטיזציה שנלקחו באזור המוקרן שליד הממשק, בקצבי סריקת שדה שונים. ניתן לראות כי עקומות אלה שנלקחו ביחס לאלה שהצגנו בסעיפים הקודמים. הסיבה לקטיעה זו נעוצה בכך שאנו מגבילים קטועות ביחס לאלה שהצגנו בסעיפים הקודמים. הסיבה לקטיעה זו נעוצה בכך שאנו מגבילים את השדה החיצוני עד לערכו של B_{onset} , המתאים לקצב סריקת השדה. הגבלה זו נעשית מכיוון שעד לשדה זה גידולו של השדה החיצוני עבור הנקודה הנמדדת, כלומר גידולה של האינדוקציה שעד לשדה זה גידולו של השדה החיצוני עבור הנקודה הנמדדת, כלומר גידולה של האינדוקציה באזור המוקרן, קבוע ואנו יכולים לקבוע את M(B) עבור האזור המוקרן. למרות ההגבלה באזור המוקרן, קבוע ואנו יכולים לקבוע את M(B) עבור האזור המוקרן. למרות ההגבלה האינדוקציה ניתן לזהות את החיצוני.



איור 5/26, עקומות מגנטיזציה לוקאליות באזור המוקרן שליד השפה המלאכותית, עקומות אלה נלקחו בטמפרטורה של 30K/ השוני בין כל עקומה הוא בקצב גידול האינדוקציה באזור הלא מוקרן-המשמש כשדה חיצוני עבור האזור המוקרן/ הקו האפור עובר בין B_{onset} של כל עקומה/

את שדה ה- onset ניתן לזהות בברור על ידי תחילת הקפיצה לכיוון השיא השני, אותו כאמור לא נראה עקב מגבלות האינדוקציה. גם עבור נקודות אלה נוכל לנצל את תלותו של בקצב גיראה עקב מגבלות האינדוקציה. גם עבור נקודות אלה נוכל לנצל את תלותו של גיראה עקב מגבלות האינדוקציה. גם עבור נקודות אלה נוכל לנצל את תלותו של גיראה לא נראה עקב מגבלות האינדוקציה. גם עבור נקודות אלה נוכל לנצל את תלותו של גיראה לא נראה עקב מגבלות האינדוקציה. גם עבור נקודות אלה נוכל לנצל את תלותו של גיראה לא נראה עקב מגבלות האינדוקציה. גם עבור נקודות אלה נוכל לנצל את תלותו של גיראה לא נראה עקב מגבלות האינדוקציה. גם עבור נקודות אלה נוכל לנצל את תלותו של גיראה לא נראה עקב מגבלות האינדוקציה. גם עבור נקודות אלה נוכל לנצל את תלותו של השדה, ואת אי תלותו במיקום, עבור קצב סריקת שדה מסוים, בכדי לאפיין את גידולו של השדה, ואת היה גוותו במיקום, עבור קצב סריקת שדה מסוים, בכדי לאפיין את גידולו של השדה, ואת היה גוותו במיקום, עבור קצב סריקת שדה מסוים, בכדי לאפיין את גידולו של השדה, ואת היה גידולו של השדה, ואת המסוים, גידולו של השדה, ואת היה גידולו של השדה, ואת היה היה גבחים, עבור קצב סריקת שדה מסוים, בכדי לאפיין היה גידולו של השדה, ואת היה היה גוותו היה, ונבחן את תפקידו של פנים הדגם (bulk) ביצירת המצבים הטרנזיינטים.

בפרק הבא אנו נראה כיצד אנו מנצלים את תלותם של מאפייני עקומת המגנטיזציה בחלון זמן המדידה, בכדי לקבל את זמן החיים של המצבים הטרנזיינטים. זמן החיים של המצבים הטרנזיינטים, הוא הפרמטר העיקרי לאפיון הדינאמיקה של שריג הפלקסונים במצב הטרנזיינטים, הוא הפרמטר בין זמני החיים וקצב גידולו של השדה החיצוני מתקבל הטרנזיינטי. כפי שנראה, הקשר בין זמני החיים וקצב גידולו של השדה החיצוני מתקבל מתקבל מתקבל. ממקשר הבא: $\frac{dH_{ext}}{dt} = \frac{1}{(\partial \tau / \partial B)_{B=B_{f_0}}}$, אותו מקבלים מתוך דינאמיקה של מצבים טרנזיינטים, שנחקרה בפרטים בעבר [7,20], ממנה נביא בפרק הבא. בתהליך חילוץ זמן החיים,

. au_{0} , אי-סדר, B_{od} , וכן את קבוע זמן החיים, אנו נקבל גם את שדה המעבר התרמודינמי סדר אי-סדר, א

פרק 6. ניתוח התוצאות

בפרק זה נראה כיצד אנו מחלצים מתוך מדידות של עקומות המגנטיזציה הלוקאליות, פרמטרים מהם נוכל ללמוד על התנהגות מערך הפלקסונים הנמצא במצב טרנזיינטי, זמני, לא מסודר. זמן החיים של מצבים אלו, *τ*, הוא המאפיין המרכזי של המצבים הטרנזיינטים. קבלת זמני החיים מתוך תוצאות המדידה, נשען על מחקר מפורט קודם [7,20], העוסק בחקר דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים, מתוך דינאמיקת השבר המופיע בפרופיל האינדוקציה. בסעיף הבא נביא ממחקר זה, את הקשר שבין דינאמיקת השבר וזמני החיים. לאחר מכן, בהתבסס על האמור לעיל, נציג את תוצאות הניתוח עבור תוצאות המדידה מהפרק הקודם.

<u>6/2 זמני חיים ודינאמיקת השבר</u>

בסריקת שדה עולה נצפה כאמור, להזרקה של מצבים טרנזיינטים לא מסודרים דרך שפות הדגם. במקרה כזה, למצב הטרנזיינטי נדרש זמן חיים, τ , עד שיעלם ושריג הפלקסונים יהיה הדגם. במקרה כזה, למצב הטרנזיינטי נדרש זמן חיים, τ , עד שיעלם ושריג הפלקסונים יהיה במצב מסודר. באינדוקציות נמוכות τ קצר מאד שכן הפאזה התרמו דינאמית המסודרת היא המועדפת. ככל שמתקרבים באינדוקציה ל- B_{od} , זמן החיים מתארך, שכן הפאזה התרמו דינאמית הנסופי. דינאמית הלא מסודרת היא המועדפת, עד שבאינדוקציה השווה ל

$$.\tau = \frac{\tau_0}{\left(1 - \frac{B}{B_{od}}\right)^{\gamma}}$$
 (1)

כאשר $2 = \gamma$. ו- γ_0^{-1} הוא קבוע הזמן. בטווח הטמפרטורות בהן עוסקת עבודה זו, התפלגות השדה המגנטי לרוחב הדגם אינה הומוגנית. התפלגות זו מובילה בקרוב, לפי מודל Bean, לזרם השדה המגנטי לרוחב הדגם. הופעתו של השיא השני (SMP) שעל עקומת המגנטיזציה, מצביעה קריטי קבוע לאורך הדגם. הופעתו של השיא השני (SMP) שעל עקומת המגנטיזציה, מצביעה כאמור, על קפיצה בזרם הקריטי הנובעת ממעברו של מערך הפלקסונים לפאזה הלא מסודרת, באינדוקציות נמוכות מקו המערך הפלקסונים לפאזה הלא מסודרת, שביעה קפיצה בזרם הקריטי הנובעת ממעברו של מערך הפלקסונים לפאזה הלא מסודרת, שבאינדוקציות נמוכות מקו המעבר, המנובעת ממעברו של מערך הפלקסונים לפאזה הלא מסודרת, שביע כאמור, על קפיצה בזרם הקריטי הנובעת ממעברו של מערך הפלקסונים לפאזה הלא מסודרת, באינדוקציות נמוכות מקו המעבר, המנוכות מקו המעבר, הקדים מצבים טרנזיינטים מופיע כאמור, שבר על פרופיל האינדוקציה באינדוקציות נמוכות מ- B_{od} . כאשר מוזרקים מצבים טרנזיינטים מופיע כאמור, שבר על פרופיל האינדוקציה באינדוקציות נמוכות מ- B_{od} . תוך כדי ההזרקה מתרחש גם תהליך ההרפיה של המצבים הטרנזיינטים. זמן החיים של המצבים הטרנזיינטים תלוי בקצב ינהליק הרפיה של המצבים הטרנזיינטים נקריות בקצב יניתלים בתהליך הרפייתם. את מהירות התקדמות השבר בדגם, כאשר מצבים טרנזיינטים נלקחים בחשבון, ניתן לבטא, כפי שתואר לפרטים בעבר [20], על ידי המשוואה הבאה י

$$\frac{\partial x_t}{\partial t} = \frac{1}{j_h} \frac{dH_{ext}}{dt} - x_f \frac{\partial}{\partial t} (\ln j_h) - \frac{1}{j_h} \frac{1}{(\partial \tau / \partial B)_{B=B_f}}$$
(2)

כל איבר במשוואה זו מייצג ייכוחיי מניע אחר בתהליך היצירה וההרפיה של המצבים כל איבר במשוואה זו מייצג $\frac{1}{j_h} \frac{dH_{ext}}{dt}$: הטרנזיינטים $\frac{1}{j_h} \frac{dH_{ext}}{dt}$

השדה החיצוני. - $x_f \frac{\partial}{\partial t} (\ln j_h)$ השדה החיצוני. השדה החיצוני.

שטף [43]. שני איברים אלו מתארים ״כוחות״ הגורמים לשבר לנוע לכיוון מרכז הדגם. שטף [43]. שני איברים אלו מתארים ״כוחות״ הגורם לשבר לנוע בכיוון הפוך. בעבודה זו $\frac{1}{j_h} \frac{1}{(\partial \tau / \partial B)_{B=B_f}}$ - מתאר את תהליך ההרפיה, הגורם לשבר לנוע בכיוון הפוך. בעבודה זו מצבים טרנזיינטים לא מסודרים הוזרקו לדגם החצי מוקרן דרך שפותיו במשך כל הניסוי מצבים טרנזיינטים לא מסודרים הוזרקו לדגם החצי מוקרן דרך שפותיו במשך כל הניסוי מצבים ערנזיינטים לא מסודרים הוזרקו לדגם החצי מוקרן דרך שפותיו במשך כל הניסוי מצבים טרנזיינטים לא מסודרים הוזרקו לדגם החצי מוקרן דרך שפותיו במשך כל הניסוי מצבים ערנזיינטים לא מסודרים הוזרקו לדגם החצי מוקרן דרך שפותיו במשך כל הניסוי מצבים טרנזיינטים לא מסודרים הוזרקו לדגם החצי מוקרן שטף [43]. השבר שעל פרופיל האינדוקציה מופיע לראשונה בקצות הדגם וכיוון תנועתו יהיה לעבר מרכז הדגם, מה שמעיד על השתלטות מופיע לראשונה בקצות הדגם וכיוון תנועתו יהיה לעבר מרכז הדגם, מה שמעיד על השתלטות הפאזה הלא מסודרת בדגם, המתבטאת בהשתלטות של זרם מתמיד גבוה יותר בפרופיל האינדוקציה. בסעיף הבא נראה את השימוש בדינאמיקת השבר עבור ניתוח תוצאות המדידה של עקומות המגנטיזציה.

<u>6/3 עקומות מגנטיזציה ודינאמיקת השבר</u>

מדידות של עקומות המגנטיזציה, שתוארו בפרק הקודם, הראו תזוזה של B_{onset} לאינדוקציות נמוכות ככל שחלון זמן המדידה קטן. קצב עליית השדה מכתיב את ערכו של B_{onset} . B_{onset} היא נמוכות ככל שחלון זמן המדידה קטן. קצב עליית השדה מכתיב את ערכו של של B_{onset} . B_{onset} האינדוקציה בה עקומת המגנטיזציה מתחילת את הקפיצה האנומלית לכיוון השיא השני. הקפיצה האנומלית באה לידי ביטוי על פרופיל האינדוקציה בכניסתו של השבר הקפיצה האנומלית באה לידי ביטוי של השבר הקפיצה האנומלית לכיוון השיא השני. הקפיצה האנוזקציה בה עקומת המגנטיזציה מתחילת את הקפיצה האנומלית לכיוון השיא השני. השני הקפיצה האנומלית באה לידי ביטוי על פרופיל האינדוקציה בכניסתו של השבר הקפיצה הינדוקציה לראשונה, B_{f0} , הבאה הקפיצה ביטוי כ- B_{f0} . האינדוקציה בה מופיע השבר על פרופיל האינדוקציה לראשונה השרה, הבאה לידי ביטוי כ- B_{onset} על עקומת המגנטיזציה הלוקאלית, אינה תלויה במיקום הלוקאלי בו לידי ביטוי כ- dH_{ext}/dt של השבר היא אפס והוא מופיע בקרוב ב- $0 \approx f_{f}$, בקצה הדגם. במקרה מהירותו ההתחלתית של השבר היא אפס והוא מופיע בקרוב ב- $0 \approx f_{f}$, בקצה הדגם. במקרה כזה, משוואה (2) נראית כד :

$$\frac{dH_{ext}}{dt} = \frac{1}{\left(\partial \tau / \partial B\right)_{B=B_{fo}}}$$
(3)

וכאמור $B_{f0} = B_{onset}$ וכאמור ומכאן נקבל ש-

$$\frac{dH_{ext}}{dt} = \frac{1}{\left(\partial \tau / \partial B\right)_{B=B_{onset}}}$$
(4)

כלומר,
$$B_{_{onset}}$$
 עבור קצבי סריקה . $\left(rac{dH_{_{ext}}}{dt}
ight)^{\!-\!1}=(\partial au/\partial B)_{_{B=B_{_{onset}}}}$, כלומר,

-שונים של השדה החיצוני נוכל לקבל את $rac{\partial au}{\partial B}$ כפונקציה של השדה החיצוני נוכל לקבל את

עבור , au הנגזרת ממשוואה (1), אנו מחלצים את $B_{_{od}}$ ו- $au_{_{0}}$ ומכאן את זמן החיים, $rac{\partial au}{\partial B}(B)$

נקודה נתונה בדגם.

לסיכום, את דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים אנו מקבלים מתוך עקומות המגנטיזציה באופן הסיכום, את דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים אנו מקבלים מתוך עקומות המגנטיזציה בניית טבלת הבא הוצאת ערכו של B_{onset} לכל העקומות, הנבדלות זו מזו בזמן חלון המדידה. בניית טבלת הבא החצאת ערכו הוצאת ערכו של קצב עליית ערכים בה כל זוג ערכים כולל: את שדה ה-onset, ואת ערכו ההופכי של קצב עליית

השדה החיצוני, $\left(\frac{dH_{ext}}{dt}\right)^{-1} = (\partial \tau / \partial B)_{B=B_{onset}}$ וכאמור, $(dHext/dt)^{-1}$ מאוסף הזוגות השדה החיצוני, $\partial \tau / \partial B(B)$ וכאמור, $\partial \tau / \partial B(B)$ ובאנו יוצרים את $\partial \tau / \partial B$ לנקודות אלה, כאשר שהתקבל אנו יוצרים את $(\tau - \sigma)^{2}$, ומבצעים התאמה של $\sigma / \partial B$ ווארים τ מתוקב אנו יוצרים את זמן החיים τ . $\tau = \tau_{0} / (1 - B/B_{od})^{\gamma}$ בסעיפים הבאים נראה את תוצאות ניתוח זה, עבור האזור המוקרן והלא מוקרן, כתלות במקור חדירת השטף המגנטי.

6/4 זמני החיים של מצבים טרנזיינטים ליד שפות הדגם

בסעיף זה אנו משווים את דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים שחדרו לדגם משפותיו הטבעיות, בסעיף זה אנו משווים את דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים שחדרו לדגם משפותיו הנקודות באזור הלא המוקרן אל מול האזור מוקרן. איור $\left\{\left(dHext/dt\right)^{-1},B_{onset}
ight\}$

-אמה הרציף מראה התאמה ל-. (b), כאשר הדגם קורר לטמפרטורה של 30K. הקו הרציף מראה התאמה ל-

$$\left(\frac{\partial \tau}{\partial B}\right)_{B=Bonset} = 2\tau_0 / \left(1 - B / B_{od}\right)^3 / B_{od}$$



 $r = \left(au_0 / (1 - B / B_{od})^r \right)^{-1}$ איור 100 איור 200 איור ($\partial au/\partial B$)_{B=Bonset} איור אמוקרן יעקומה עליונה ($\tau_0 = 1$ התאמה סובה התקבלה עבור $2 = \gamma$ מתוך ההתאמה התקבלו הערכים B_{od} ו' τ_0 באזור המוקרן יעקומה עליונה ($\gamma = 2$ באזור המוקרן יעקומה עליונה) התאמה סובה התקבלה עבור 2 = γ מתוך ההתאמה התקבלו הערכים שהוורקו לדגם משפותיו בטמפרטורה של 30K והלא מוקרן יעקומה תחתונה? עבור מצבים טרנויינטים שהוורקו לדגם משפותיו בטמפרטורה של 30K והלא מוקרן יעקומה תחתונה? עבור מצבים טרנויינטים שהוורקו לדגם משפותיו בטמפרטורה של 30K מתוך ההתאמה שנעשתה באיור 5.1 קיבלנו את ערכי שדה המעבר סדר – אי-סדר, B_{od} , ואת מתוך ההתאמה שנעשתה באיור 1.5 קיבלנו את ערכי שדה המעבר סדר – אי-סדר, B_{od} , ואת קבוע הזמן, σ_0 , באזור המוקרן והלא מוקרן. תוצאות אלה מראות כי שדה המעבר באזור המוקרן קבוע הזמן, מון מזה שבאזור הלא מוקרן. כמו כן, קבוע הזמן הימן (τ_0 , ארוך יותר באזור המוקרן מזה שבמוקרן. איור 5.2 מראה את תלותו של τ_0 בטמפרטורה, באזורים השונים, בהתאמה מזה שבמוקרן. איור 5.2 מראה את תלותו של τ_0

לחוק ארניוס (Arrhenius) לחוק ארניוס . au_a כאשר . $au_a(T) = A \exp(rac{U_a}{T})$: (Arrhenius) לחוק ארניוס

. $A = 6.4 * 10^{-7}$ אי-סדר – סדר עבור מערך הפלקסונים [13]. מתוך ההתאמה מצאנו כי



; געור געות בטמפרטורה, הקו התחתון שייך לאזור הלא מוקרן המתאים לחוק ארגיוס au_0 , איור געור (au_0 , au_0

מתוך איור זה ניתן לראות כי ההבדל ב- au_0 בין האזור המוקרן והלא מוקרן הולך ונעשה פחות מתוך איור עם עליית הטמפרטורה. מתוך ההתאמה לחוק ארניוס, אנו מקבלים כי האנרגיה עבור השמעותי עם עליית הסמפרטורה. מתוך ההתאמה לחוק ארניוס, אנו מוקרן. המעבר אי-סדר – סדר באזור המוקרן, גבוהה מזו שבאזור הלא מוקרן.

, $\tau(B)$ עבור האזור המוקרן והלא מוקרן, נוכל לתאר את זמני החיים, B_{od} יו τ_0 עבור τ_0 אחר מציאת $\tau = \left(\tau_0 / \left(1 - B / B_{od} \right)^{\gamma} \right)$ אויר 5.3 מתאר את של המצבים הטרנזיינטים עבור כל אזור לפי $(\tau(B), \tau(B), \tau(B))$ אויר המוקרן והלא מוקרן ההבדל בין זמן החיים, $\tau(B)$, של המצבים הטרנזיינטים באזור המוקרן והלא מוקרן בטמפרטורה של 30K, כפונקציה של האינדוקציה המגנטית *המנורמלת* לערכו של שדה המעבר סדר – אי-סדר, $\frac{B}{B_{od}}$.

איור 6/4/ זמני החיים של המצבים הטרנויינטים שהוזרקו לדגם- משפותיו הטבעיות- לאזור הלא מוקרן אדום(ולאזור הלא מוקרן *שחור(- אחרי שהדגם קורר ל. 30K/

מתוך איור 5.3 ניתן לראות כי ההקרנה משפיעה על זמני החיים של המצבים הטרנזיינטים. עבור טמפרטורה ואינדוקציה מסוימת זמן החיים באזור המוקרן ארוך יותר מזה שבאזור הלא מוקרן, עבור שטף המוזרק מקצות הדגם.

כאמור, שטף מגנטי מוזרק לאזור המוקרן משפתיו הטבעיות אך בו זמנית מוזרק מהאזור הלא מוקרן באזור דרך ממשק ההקרנה. בסעיפים הבאים נביא את ממצאי הזרקה זו. על ידי ניתוח דומה לזה שעשינו לעיל, נוכל לבחון את תפקידו של פנים הדגם (bulk) ביצירת המצבים הטרנזיינטים.

6/5 זמן החיים של מצבים טרנזיינטים ליד הממשק

כפי שהוצג בפרק הקודם, מצבים טרנזיינטים נוצרו באזור המוקרן כתוצאה משטף מגנטי שחדר לאזור המוקרן מהאזור הלא מוקרן, דרך הממשק שבין האזור המוקרן והלא מוקרן. כפי שנעשה בסעיפים הקודמים עבור נקודות ליד שפות הדגם הטבעיות, נמצא את זמן החיים של המצבים הטרנזיינטים שנוצרו באזור המוקרן שליד הממשק. את זמן החיים באזור זה אנו של המצבים הטרנזיינטים שנוצרו באזור המוקרן שליד הממשק. את זמן החיים באזור זה אנו מוצאים מתוך הקשר שבין ${\partial \tau}_{\partial B}_{B=Bonset}$ לקצב גידולה של האינדוקציה באזור הלא מוקרן, מוצאים מתוך הקשר שבין ${\partial \theta}_{B=Bonset}$ לקצב גידולה של האינדוקציה באזור הלא מוקרן, מוצאים מתוך הקשר שבין ${\partial \theta}_{B=Bonset}$ לקצב גידולה של האינדוקציה באזור הלא מוקרן, מובאים מתוך הקשר שבין איור בסעיף 5.4. איור 5.4 מציג התאמה ל- ${dH}_{ext} = {dB \over dt}$ ההתאמה נעשתה מתוך התוצאות שהתקבלו מעקומות המגנטיזציה הלוקאליות באזור המוקרן שליד הממשק.



onset התאמה של $- au = \left(au_0 / \left(1 - B / B_{od} \right)^\gamma \right)$ כאשר $\left(\partial au / \partial B \right)_{B=Bonset}$ לערכי שדה ה. אויר 5/6, התאמה של שנמדדו מתוך עקומות המגנטיזציה שנמדדו ב. 26K- באזור המוקרן שליד הממשק בינו ובין האזור הלא מוקרן.

מתוך ההתאמה שבאיור 5.4 אנו מקבלים את שדה המעבר סדר – אי-סדר, B_{od} , באזור המוקרן (bulk) שליד השפה,וכן את קבוע הזמן, τ_0 , באזור זה. בכדי לאפיין את תפקידו של פנים הדגם (bulk) ביצירת המצבים הטרנזיינטים, אנו משווים את התוצאות לעיל עם אלה שהתקבלו באזור המוקרן שליד השפה הטבעית. נזכיר כי שני אזורים אלה נמצאים באותו אזור מוקרן,אך המוקרן שליד השפה הטבעית. נזכיר כי שני אזורים אלה נמצאים באותו אזור מוקרן,אך המוקרן שליד בין שני אזורים אלה הוא, במקור חדירת המצרים הטרנזיר.



onset התאמה של $- au = \left(au_0 / \left(1 - B / B_{od} \right)^{\gamma} \right)$ כאשר $\left(\partial au / \partial B \right)_{B=Bonset}$ לערכי שדה ה. אויר 6/6 התאמה של שדה מנטיזציה שנמדדו ב. 26K באזור המוקרן שליד השפה הטבעית

שדה המעבר, *B*_{od}, וקבוע הזמן, *τ*₀, עבור הזרקה דרך השפה הטבעית, זהים לאלה שהתקבלו בהזרקה דרך הממשק. בעזרת פרמטרים אלה אנו מאפיינים את דינאמיקת המצבים הסרנזיינטים של שריג הפלקסונים. איור 5.6 מציג את ערכי שדה ה-onset, סוגנטיזניטים את עקומות המגנטיזציה הלוקאליות בשני האזורים, להם נעשתה ההתאמה. האיור ממחיש את הקרבה בפרמטרים אלה שבין האזורים.



 $\tau = \left(\tau_0 / \left(1 - B / B_{od} \right)^{\gamma} \right)$ כאשר $\left(\partial \tau / \partial B \right)_{B=Bonset}$ לערכי שדה ה. איור 16/7 התאמה של איור 16/7 התאמה של $\left(\partial \tau / \partial B \right)_{B=Bonset}$ כאשר עקומות המגנטיזציה שנמדדו ב. א 26 - באזור המוקרן שליד השפה הטבעית והשפה המלאכותית הנקודות הכחולות שייכות לערכי ה. לערכי ה. שעל עקומות המגנטיזציה שנמדדו ליד השפה הטבעית המוקרנת? הנקודות האדומות שייכות לערכי ה. onset שעל עקומות המגנטיזציה שנמדדו ליד השפה הטבעית המוקרנת?

להיווצרותם של מצבים טרנזיינטים באזור המוקרן כתוצאה משטף שהוזרק מהאזור הלא מוקרן לאזור המוקרן דרך הממשק, מצטרפת העובדה כי מצבים אלה אינם תלויים במקור היווצרותם, אלא תלויים במדיה בה הם נוצרים.

פרק 7. סיכום התוצאות ודיון

חשיפת חציו של הדגם להקרנה ביונים כבדים מאפשרת לערוך השוואה בין דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים באזור המוקרן, אל מול אלה שבאזור הלא מוקרן, *באותו הדגם*. בקונפיגורציה זו קיבלנו הזרקה של שטף מגנטי דרך שפות הדגם אל חלקו המוקרן והלא מוקרן. כמו כן קיבלנו הזרקה של שטף מגנטי מהאזור הלא מוקרן למוקרן, דרך הממשק שבין האזורים. בשני המקרים נוצרו מצבים טרנזיינטים לא מסודרים, באזור המוקרן. הזרקה של מצבים טרנזיינטים דרך הממשק מחדדת את תפקידו של פנים הדגם (bulk) ביצירת המצבים הטרנזיינטים, בנוסף לתפקידה של שפת הדגם הטבעית. בסעיפים הבאים נדון בטכניקת ניתוח הנתונים, המאפשרת את אפיון דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים, ובתוצאותיה.

זיהוי כניסתו של המצב הטרנזיינטי 7/2

זיהווי האינדוקציה בה מוזרק המצב הטרנזיינטי לדגם, B_{f0} , נקבע בעבודות קודמות, מתוך השבר המופיע על פרופיל האינדוקציה. כאשר מדובר בניסוי סריקת שדה עולה, קשה לאתר את השבר המופיע על פרופיל האינדוקציה. כאשר מדובר בניסוי סריקת שדה עולה, קשה לאתר את הופעתו של השבר בראשיתו. קושי זה נובע ממהירות התקדמות השבר בדגם, ומחסומי שפה. הופעתו של השבר בראשיתו. קושי זה נובע ממהירות התקדמות השבר בדגם, ומחסומי שפה. הופעתו של השבר בראשיתו. קושי זה נובע ממהירות התקדמות השבר בדגם, ומחסומי שפה. הופעתו של השבר בראשיתו. קושי זה נובע ממהירות התקדמות העבר בדגם, ומחסומי שפה. הופעתו של השבר בראשיתו. קושי זה נובע ממהירות התקדמות השבר בדגם, ומחסומי שפה. בעבודה זו מצאנו דרך להתגבר על הקושי בזיהוי מדויק של B_{f0} , על ידי יצירת עקומות מגנטיזציה לוקאליות, M(B), או (B), או (B), כאשר זיהינו את שדה ה-B_{f0}, על ידי יצירת עקומות מגנטיזציה לוקאליות, M(B), או (B), או השני שדה ה-Bean, ספי שהוסבר בסעיף 4. השיא השני, כ- B_{f0} . קביעה זו מבוססת על המודל הקריטי של Bean, כפי שהוסבר בסעיף 4. ניתוח השני, כ- B_{f0} . קביעה זו מבוססת על המודל הקריטי של Bean, כפי שהוסבר בסעיף 4. ניתוח השני, כתונים מתוך עקומות מגנטיזציה לוקאליות הראו אי תלות של השדה החיצוני נתונים מתוך עקומות מגנטיזציה לוקאליות הראו הראו אי תלות של האינדו שנות של החיצוני הדגם, בהתאמה למודל. קביעתו של $B_{f0} = B_{onset}$ עבור תדירויות שונות של השדה החיצוני הדגם, בהתאמה למודל. קביעתו של $B_{f0} = B_{onset}$ עבור תדירויות שונות של השדה החיצוני הוקרן הראה, איכותית, תלות חזקה המצבים הטרנזיינטים באזורים השונים. B_{onset} המוקרן הראה, איכותית, תלות חזקה יותר בתדירות השדה החיצוני, מזו שבאזור המוקרן. תלות זו, מעידה על הגברתו של המצב הטרנזיינטי, כתוצאה מההקרנה. השוואה כמותית התאפערה על העיה מעידה על העל המצבים הטרנזיינטים כפונקציה של האינדוקציה, B, מתוך התלות ידי מדידת זמן החיים של המצבים הטרנזיינטים כפונקציה של האינדוקציה, און המתוך התלות

,
$$au = rac{ au_0}{\left(1 - rac{B_{onset}}{B_{od}}\right)^2}$$
 של B_{onset} בקצב סריקת השדה. התאמה של זמן החיים לביטוי האמפירי, $\left(1 - rac{B_{onset}}{B_{od}}\right)^2$

אפשרה קביעה של שדה המעבר התרמודינמי, B_{od} , וקבוע זמן החיים, τ_0 . ניתוח זה התבצע עבור הזרקה דרך שפותיו הטבעיות של הדגם ודרך הממשק בין האזור הלא מוקרן והמוקרן.

<u>דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים 7/3 השפעת ההקרנה על דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים</u>

המדידות הראו כי ההקרנה גרמה להתארכות זמני החיים ולירידה בשדה המעבר התרמודינמי, B_{od} , באזור המוקרן. התארכותו של זמן החיים באזור המוקרן, מתאימה לעובדה כי שדה המעבר סדר – אי-סדר, B_{od} , באזור המוקרן נמוך מזה שבאזור הלא מוקרן; זמן החיים עבור המעבר סדר – אי-סדר, B_{od} , באזור המוקרן נמוך מזה שבאזור הלא מוקרן; זמן החיים עבור המעבר סדר – אי-סדר, זמן החיים עם הקרבה, באינדוקציה, לשדה המעבר. לכן עבור טמפרטורה מסוימת הולך ומתארך עם הקרבה, באינדוקציה, לשדה המעבר. לכן עבור אינדוקציה נתונה, זמן החיים באזור המוקרן יהיה ארוך יותר מזה שבאזור הלא מוקרן. עם המפרטורה מסוימת הולך ומתארך עם הקרבה, באינדוקציה, לשדה המעבר. לכן עבור אינדוקציה נתונה, זמן החיים באזור המוקרן יהיה ארוך יותר מזה שבאזור הלא מוקרן. עם האינדוקציה נתונה זמן החיים באזור המוקרן יהיה ארוך יותר מזה שבאזור הלא מוקרן. מכאן, הגורם המשפיע על הארכת זמן החיים בנוכחות פגמים גליליים, אינו נובע רק מהנמכתו של

$$\tau=\frac{\tau_0}{\left(1-\frac{B}{B_{od}}\right)^2}$$
אלא גם מהתארכותו של קבוע הזמן . τ_0 אכן, התאמה של הביטוי , B_{od}

לתוצאות המדידה מצביעה על התארכותו של קבוע זמן החיים τ_0 , בד בבד עם הנמכתו של לתוצאות המדידה מצביעה על התארכותו של קבוע זמן החיים τ_0 , בין מני מצטמצם. מכיוון B_{od} . B_{od} . ראינו כי עם עליה בטמפרטורה, ההבדל ב τ_0 בין שני האזורים, הולך ומצטמצם. מכיוון שמדובר בהקרנה במינון נמוך, ניתן לראות כי בטווח טמפרטורות קצר, האנרגיה התרמית המדובר בהקרנה במינון נמוך, ניתן לראות כי בטווח טמפרטורות קצר, האנרגיה התרמית מתובר בהקרנה במינון נמוך, ניתן לראות כי בטווח מפרטורות קצר, האנרגיה התרמית מתובר בהקרנה במינון נמוך, ניתן לראות כי בטווח טמפרטורות קצר, האנרגיה התרמית מתובר בהקרנה במינון נמוך, ניתן לראות כי בטווח טמפרטורות קצר, האנרגיה התרמית סית מתובר בהקרנה במינון נמוך, ניתן לראות סית סית מפרטורות סית מפרטורות קצר, האנרגיה הדרושה למעבר אי-סדר סיתוך תלותו של τ_0 בטמפרטורה, חילצנו את אנרגית האקטיבציה הדרושה למעבר אי-סדר סית, ומצאנו כי אנרגיה זו גבוהה יותר באזור המוקרן.

7/4 הזרקה של מצבים טרנזיינטים דרך ממשק ההקרנה

התפתחות פרופיל האינדוקציה החד ממדי, B(x,t), הראה הזרקה של שטף מגנטי מסודר (זרם נמוד) מהאזור הלא מוקרן לאזור המוקרן דרך הממשק. במעבר זה, נוצר מצב לא מסודר (זרם גמוד) מהאזור הלא מוקרן לאזור המוקרן דרך הממשק. במעבר זה, נוצר מצבים טרנזיינטים גבוה) באזור המוקרן שליד הממשק. מתוך כך, הצלחנו לאתר הזרקתם של מצבים טרנזיינטים גבוה) בדרך הממשק. חשוב לציין, כי וידאנו שמצבים טרנזיינטים אלה, מקורם במעבר דרך הממשק.

ולא משפות הדגם. תוצאה זו, מאתגרת את ההשקפה הרווחת כי מקורם של המצבים הטרנזיינטים, קשור במחסומי שפה לא הומוגניים. ניתוח דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים הנ״ל, הראו תוצאה מעניינת: קיבלנו כי זמני החיים של המצבים הטרנזיינטים אינם תלויים במקור הזרקתם – כלומר, אותם זמני חיים מתקבלים באזור המוקרן בהזרקת שטף דרך השפה הטבעית של הדגם ודרך הממשק. תוצאה זו מציינת, כי זמן החיים של המצבים הטרנזיינטים, היא תכונה אינטרינזית של פנים הדגם (bulk).

7/5 סיכום ומסקנות

ראינו כי הקרנה של יונים כבדים במינון נמוך גורמת להתארכות בזמן החיים של המצבים הטרנזיינטים הלא מסודרים. מצאנו כי התארכות זו מקורה לא רק בהנמכה של שדה המעבר הטרנזיינטים הלא מסודרים. מצאנו כי התארכות זו מקורה לא רק בהנמכה של שדה המעבר התרמודינמי *B*_{od}, אלא גם בגידול באנרגית האקטיבציה הדרושה למעבר אי-סדר – סדר. התארכות בזמן החיים מגבירה את האפקטים של מצבים טרנזיינטים באזור המוקרן, אשר מתבטאים במריחה והזזה כלפי מטה של שיא המגנטיזציה השני.

מקובל לזהות מצב לא מסודר של מערך הפלקסונים כמצב שבו הפלקסונים מסתבכים בינם לבין עצמם (entangled state). על בסיס תמונה זו ניתן היה לצפות שהפגמים הגליליים ימנעו הסתבכות זו ובכך יגרמו לדיכוי של המצב הלא מסודר הטרנזיינטי. התוצאות שלנו מראות הגברה ולא דיכוי, של מצבים טרנזיינטים בנוכחותם של פגמים גליליים, מה שמטיל בספק את הזיהוי של מצבים לא מסודרים כמערך של פלקסונים מסובכים (entangled).

כמו כן, הראנו כי ניתן ליצור מצבים טרנזיינטים באזור המוקרן, על ידי הזרקת שטף מגנטי מהאזור הלא מוקרן דרך הממשק שביניהם. יתר על כן, מצאנו כי זמני החיים של מצבים אלה זהים לזמני החיים של המצבים הטרנזיינטים שהוזרקו דרך השפה הטבעית של הדגם. ממצאים אלה מעלים את האפשרות כי פנים הדגם שותף ביצירת המצבים הטרנזיינטים הלא מסודרים. אופים הזהה של המצבים הטרנזיינטים ללא תלות במקור הזרקתם, ממשק או שפה טבעית, מעיד כי דינאמיקת המצבים הטרנזיינטים אינה תלויה במקורם, אלה במדיה אליה הוזרקו.

48

פרק 8. ביבליוגרפיה

[1] M. Cyrot and D. Pavuna, *Introduction to Superconductivity and High T_c Materials*, World Scientific (New York, 1992).

[2] G. Blatter, M. V. Feigel'man, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin and V. M. Vinokur, Rev. Mod. Phys. **66**, 1125 (1994).

[3] E. H. Brandt, Rep. Prog. Phys. 58, 1465 (1995).

[4] T. Giamarchi, and S. Bhattacharya, arXiv:cond-mat/0111052v1 (2001).

[5] D. Ertas and D. R. Nelson, Physica C 272, 79 (1996).

[6] H. Safar, P. L. Gammel, D. A. Huse, D. J. Bishop, W. C. Lee, J. Giapintzakis and D. M. Ginsberg, Phys. Rev. Lett. **70**, 3800 (1993).

[7] B. Kalisky, *Generation and Annealing of Transient Disordered Vortex States in High-Temperature Superconductors*, Bar Ilan University, Ramat Gan, Ph. D. thesis (2003).

[8] E. Zeldov, D. Majer, M. Konczykowski, V. B. Geshkenbein, V. M. Vinokur and H. Shtrikman, Nature **375**, 373 (1995).

[9] Y. Abulafia, D. Giller, Y. Wolfus, A. Shaulov, Y. Yeshurun, D. Majer, E. Zeldov, J. L. Peng and R. L. Greene, J. Appl. Phys. **81**, 4944 (1997).

[10] L. A. Dorosinskii, M. V. Indenbom, V. I. Nikitenko, Yu. A. Ossipyan, A. A. Polyanskii and V. K. Vlasko-Vlasov, Physica C **203**, 149 (1992).

[11] M. R. Koblischka and R. J. Wijngaarden, Supercond. Sci. Technol. **4**, 199 (1995).

[12] T. Giamarchi and P. Le Doussal, Phys. Rev. B 55, 6577 (1997).

[13] V. M. Vinokur, B. Khaykovich, E. Zeldov, M. Konczykowski, R. A. Doyle and P. H. Kes, Physica C **295**, 209 (1998).

[14] B. Khaykovich, E. Zeldov, D. Majer, T. W. Li, P. H. Kes and M. Konczykowski, Phys. Rev. Lett. **76**, 2555 (1996).

[15] N. Avraham, B. K. Novich, Y. Myasoedov, M. Rappaport, H. Shtrikman, D.E. Feldman, T. Tamegai, P.H. Kes, M. Li, M. Konczykowski, K. v. d. Beek and E. Zeldov, Nature **411**, 451 (2001).

[16] S. Bhattacharya and M. J. Higgins, Phys. Rev. Lett. 7, 2617 (1993).

[17] D. Giller, A. Shaulov, T. Tamegai and Y. Yeshurun, Phys. Rev. Lett. **84**, 3698 (2000).

[18] B. Kalisky, Y. Wolfus, A. Shaulov and Y. Yeshurun, Physica C **388**, 737 (2003).

[19] C. P. Bean, Phys. Rev. Lett. 8, 250 (1962).

[20] B. Kalisky, Y. Bruckental, A. Shaulov and Y. Yeshurun, Phys. Rev. B **68**, 224515 (2003).

[21] B. Kalisky, A. Shaulov, T. Tamegai and Y. Yeshurun, J. Appl. Phys. **93**, 8659 (2003).

[22] S. F. W. R. Rycroft, R. A. Doyle, D. T. Fuchs, E. Zeldov, R. J. Drost, P. H. Kes, T. Tamegai, S. Ooi, A. M. Campbell, W. Y. Liang and D. T. Foord, Superconductor Science and Technology **12**, 1067 (1999).

[23] S.F.W.R. Rycroft, R. A. Doyle, D. T. Fuchs, E. Zeldov, R. J. Drost, P. H. Kes, T. Tamegai, S. Ooi and D. T. Foord, Phys. Rev .B **60**, 757 (1999).

[24] V. V. Moshchalkov, V. V. Metlushko, G. Guntherodt, I. N. Goncharov, A. Yu. Didyk and Y. Bruynseraede, Phys. Rev. B **50**, 639 (1994).

[25] B. Khaykovich, M. Konczykowski, E. Zeldov, R. A. Doyle, D. Majer, P. H. Kes and T. W. Li, Phys. Rev. B 56, 517 (1997).

[26] L. Civale, A. D. Marwick, T. K. Worthington, M. A. Kirk, J. R. Thompson, L. Krusin-Elbaum, Y. Sun, J.R. Clem and F. Holtzberg, Phys. Rev. Lett. **67**, 648 (1991).

[27] Th. Schuster, M. R. Koblischka, H. Kuhn, H. Kronmuller ,M. Leghissa, W. Gerhauser, G. Saemann-Ischenko, Neumuller H. W. and Klaumunzer S., Phys. Rev. B **46**, 8496 (1992).

[28] C. J. van der Beek, M. Konczykowski, T. W. Li, P. H. Kes and W. Benoit, Phys. Rev. B **54**, 792 (1996).

[29] L. Civale, Supercond. Sci. Technol. 10, A11 (1997).

[30] D. Barness, M. Sinvani, A. Shaulov, T. Tamegai and Y. Yeshurun, J. Appl. Phys. **105**, 1 (2009).

[31] M. Menghini, Y. Fasano, F. de la Cruz, S. S. Banerjee, Y. Myasoedov ,E. Zeldov, C.J. van der Beek, M. Konczykowski and T. Tamegai, Phys. Rev. Lett. **90**, 147001 (2003).

[32] S. S. Banerjee, A. Soibel, Y. Myasoedov, M. Rappaport, E. Zeldov, M. Menghini, Y. Fasano, F. de la Cruz, C. J. van der Beek, M. Konczykowski and T. Tamegai, Phys. Rev. Lett. **90**, 087004 (2003).

[33] N. Avraham, E. H. Brandt, G. P. Mikitik, Y. Myasoedov, M. Rappaport, E. Zeldov, C. J. van der Beek, M. Konczykowski and T. Tamegai, Phys. Rev. B **77**, 214525 (2008).

[34] T. Verdene, H. Beidenkopf, Y. Myasoedov, H. Shtrikman, M. Rappaport, E. Zeldov and T. Tamegai, Phys. Rev. Lett. **101**, 157003 (2008).

[35] T. H. Johansen, M. Baziljevich, D. V. Shantsev, P. E. Goa, Y. M. Galperin, W. N. Kang, H. J. Kim, E. M. Choi, M.-S. Kim and S. I. Lee, Supercond. Sci. Technol. **14**, 726 (2001).

[36] D. Barness, *Flux Instabilities in Partially Irradiated Bi*₂*Sr*₂*CaCu*₂*O*_{8+ δ} *Crystals*, Bar Ilan University, Ramat Gan, Ph. D. thesis (2009).

[37] N. Motohira, K. Kuwahara, T. Hasegawa, K. Kishio and K. Kitazawa, J. Ceram. Soc. Jpn. **97**, 1009 (1989)

[38] G. Szenes, Phys. Rev. B 54, 12458 (1996).

[39] D. Majer, E. Zeldov, H. Shtrikman and M. Konczykowski (1996). Local Magnetization Measurements in High Temperature Superconductors. <u>Coherence in High Temperature Superconductors</u>. G .Deutscher and A. Revcolevschi. Singapore, World Scientific: 271.

[40] C. P. Bean, Rev. Mod. Phys. 36, 31 (1964).

[41] D. T. Fuchs, E. Zeldov, T. Tamegai, S. Ooi, M. Rappaport and H. Shtrikman, Phys. Rev. Lett. **80**, 4971 (1998).

[42] C. P. Bean and J.D. Livingston, Phys. Rev. Lett. 12, 14 (1964).

[43] Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff and A. Shaulov, Rev. Mod. Phys. **68**, 911 (1996).

BAR-ILAN UNIVERSITY

Effects of columnar defects on transient disordered vortex states

in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ single crystals

DANIEL LEVI

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

Ramat-Gan, Israel

April, 2009

This work was carried out under the supervision of

Professor Yosef Yeshurun

and

Professor Avner Shaulov

Department of Physics

Bar-Ilan University

Table of contents

AbstractI
2. Introduction1
2.1 H-T Phase diagram1
2.2 Order-Disordered transition4
2.3 Transient Disordered Vortex States (TDVS)6
2.4 Life time of TDVS8
2.5 Vortex lattice in the presence of artificial defects11
2.6 Research topics
3. Experimental14
3.1 Magneto-optical system15
3.2 Experimental set up16
3.3 Analysis process
3.4 Heavy ion irradiation
4. Results25
4.1 Penetration of magnetic flux
4.2 Local magnetization curves and induction profiles
4.3 Local magnetization curves at the sample edges35
4.4 Magnetization curves at different ramp rates
4.5 Penetration of magnetic flux through the interface40
4.6 Local magnetization curves near the interface43
5. Data analysis47
5.1 Dynamics of transient states47
5.2 Local magnetization curves and the dynamic of the "break"49
5.3 Transient states life time near sample edges50
5.4 Transient states life time near the interface54
6. Summary and discussion58
6.1 Transient state injection
6.2 Effects of irradiation on the TDVS dynamics59

6.3 Injection of TDVS through the interface	60
6.4 Summary and conclusions	61
7. Reference	63

Abstract

We describe an experimental study of the generation and dynamics of transient disordered vortex states in a uniquely configured $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ single crystal: *Part* of the crystal was exposed to heavy-ion irradiation, introducing columnar defects throughout the thickness of the sample that act as strong pinning centers. This configuration enabled us to compare the dynamics of the transient disordered vortex states in the irradiated and pristine regions in the same sample. By employing magneto-optical imaging we were able to map the local magnetic induction distribution while the external field was ramped up at a constant rate. This mapping enabled the extraction of local magnetization curves at various locations in the sample. These curves exhibit a second magnetization peak (SMP) at a ramp-rate dependent induction, revealing the existence of transient disordered vortex states. We identified the SMP onset as the induction at which the disordered state is injected into the sample. By evaluating the onset induction for various ramp rates we were able to estimate the transient state lifetime as a function of the local induction at various temperatures.

We found that the life time of the transient states, injected through the sample edges, was significantly longer in the irradiated region as compared to that in the pristine region. We further showed that the enhanced lifetime in the irradiated region originates from a reduction of the order-disorder transition induction and, more importantly, from an enhancement of the activation energy for the annealing of the transient states.

In addition, the unique configuration of our sample allowed demonstration of disordered transient states generated in the irradiated region by injecting *ordered*

states through the interface between the pristine and the irradiated regions. Our measurements showed that the lifetime of these transient states, injected directly throw the bulk of the sample, matches that of the states injected through the sample edges. The injection of transient states within the bulk of the sample challenges the claim that inhomogeneous surface barriers are the sole source responsible for the creation of transient disordered vortex states.