



אוניברסיטת
בר-אילן

תצורות שטף דנדריטיות בפילמים דקים של $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

אלרון ברוך-אל

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



אוניברסיטת
בר-אילן

תצורות שטף דנדריטיות בפילמים דקים של $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

אלרון ברוך-אל

עבודה זו מוגשת כחלק מהדרישות לשם קבלת תואר מוסמך

במחלקה לפיסיקה, אוניברסיטת בר-אילן

עבודה זו נכתבה בהנחיית פרופסור יוסף ישורון,
המכון למוליכות על והמכון לננוטכנולוגיה, המחלקה לפיסיקה,
אוניברסיטת בר-אילן.

תודות

בראש ובראשונה הערכתי ותודתי הכנה נתונות לפרופ' יוסי ישורון על הנחייתו ותמיכתו המקצועית והסבלנית לאורך הדרך ובכל שלבי העבודה. הצעותיו המחכימות, והערותיו החשובות האירו וסייעו לי להתמודד עם האתגרים במהלך המחקר והביאו לי פירות המוצגים בעבודה זו.

תודה מיוחדת לפרופ' מיכאל בזילביץ' על הדרכתו ומעורבותו בחפץ-לב במהלך המחקר, לרבות הסברים ודיונים רבים שתרמו ידע רב, ותובנות חדשות.

תודתי נתונה גם לפרופ' אבנר שאולוב על דיונים פוריים בנושאי המחקר שהניבו תועלת רבה.

תודה נוספת נתונה לכל צוות המעבדה למוליכות-על שהיווה כחממה מדעית וחברתית; ד"ר שוקי וולפוס, ד"ר אלכס פרידמן, יאשה ניקולשין, אילן חכימי, ליאור שני, אלעד בר ועומרי שרון. העזרה השוטפת, והאווירה התומכת היוו חלק חיוני במהלך התקופה.

תודה למנחם כץ על סיוע טכני ומתן מענה לבעיות ניסיונית במהלך המחקר.

לחברי היקר דניאל לוי, תודה גדולה על שיתוף הידע הנרחב, העזרה והתמיכה, האוזן הקשבת והחברות האמתית והכנה.

למחלקה לפיסיקה ולצוות האדמיניסטרטיבי, על הסיוע והמענה בכל שאלה ובקשה.

למכון לננו-טכנולוגיה (BINA) ובפרט ליוסי אבולעפיה ומשה פלדברג.

להורי היקרים ולאשתי האהובה, ליטל, תודה רבה על הסבלנות, ההבנה, החיזוק והעידוד, והרוח הגבית העצומה לאורך כל הדרך.

העבודה נתמכה חלקית ע"י הקרן הישראלית למדע (ISF) וע"י הקרן הדו-לאומית למחקר ישראל-גרמניה (DIP).

תוכן עניינים

א	תקציר	14
1	פרק 1 – מבוא	1
3	תיאורית אי-היציבות התרמו-מגנטית	3
7	פרק 2 - המערכת הניסיונית	7
7	2.1 המערכת המגנטו-אופטית	7
9	2.2 מבנה המערכת הניסיונית	9
14	2.3 ניתוח ועיבוד הנתונים	14
16	2.4 דגמי ה- YBCO	16
19	פרק 3 – תוצאות ודיון	19
19	3.1 תצורות חדירת שטף מגנטי יציבות במוליכי על	19
20	3.2 חדירת שטף בלתי יציבה בשכבות דקות של YBCO	20
28	3.3 תנאי הסף להתפתחות חדירת השטף הדנדריטית	28
30	דיון	30
34	3.4 דיאגרמת הפאזה ליציבות דגמי ה- YBCO המגודלים על מצע ה- YSZ	34
35	דיון	35
37	3.5 נזקים פרמננטיים שנגרמו בדגמי ה- YBCO כתוצאה מפריצות השטף המגנטי	37
40	דיון	40
42	3.6 שינוי בתצורות השטף הדנדריטיות כתלות בטמפרטורת הדגם	42
44	דיון	44
46	3.7 משך הזמן להתפתחות הדנדריט מרגע הפריצה	46
47	דיון	47
48	פרק 4 – סיכום ומסקנות	48
51	פרק 5 – רשימת מקורות	51
I	ABSTRACT	I

רשימת פרסומים - אלרון ברוך אל

1. **Dendritic instability in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films triggered by applied magnetic fields**

M. Baziljevich, E. Baruch-El, T. H. Johansen and Y. Yeshurun

Applied Physics Letters, **105**, 012602 (2014).

2. **Substrate Influence on Dendritic Flux Instability in YBCO Thin Films**

E. Baruch-El, M. Baziljevich, T. H. Johansen and Y. Yeshurun

Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, submitted for publication (2014).

התנגדותם של מוליכי העל לחדירת שטף מגנטי היא אחת התכונות הבסיסיות בתופעת מוליכות העל, ומעצם היותה ככזו היא מהווה מוקד לעניין מחקרי רב לאורך השנים. בעת חשיפת מוליך-על לשדה מגנטי שמעל לשדה הקריטי הראשון חודר שטף משפת הדגם אל תוכו; החדירה מתאפיינת, בדרך כלל, בחזית אחידה ויציבה. במהלך השנים האחרונות נראו גם תצורות מורכבות יותר, לא יציבות, של חזית שטף מגנטי בפילמים מוליכי-על. חדירת השטף בתצורות לא יציבות אלו, לרבות שטף בתצורה דנדריטית, נצפו בטכניקות של הדמיה מגנטו-אופטית בתחומי טמפרטורה ושדות מגנטיים שונים, בעיקר במוליכי על 'קונבנציונליים' כמו MgB_2 [1-4], Nb_3Sn [5], Nb [6,7], NbN [8], YNi_2B_2C [9], ו- Pb [10]. בכל המקרים, פריצות השטף הדנדריטיות נוצרו תוך כדי העלאת שדה מגנטי מעל לשדה-סף התלוי בטמפרטורה.

תופעת מפולות השטף המגנטי במוליכי העל מקורה באי יציבות תרמו-מגנטית. תנועת שטף מוגברת מביאה לחימום לוקאלי והחלשות באנרגיית הלכידה של הפלקסונים, החלשות המביאה לתנועת שטף נוספת וחימום נוסף. כאשר מוליך העל והמצע לא מצליחים לפזר את החום שמצטבר נוצרת פריצה דנדריטית של השדה. הסבר זה להווצרות הדנדריטים צריך להיות תקף גם למוליכי העל בטמפרטורות גבוהות (HTS) ובכל זאת, למרות מאמצים ניסיוניים רבים, ב-HTS לא נצפו תצורות דנדריטיות להוציא במקרה יוצא מן הכלל אחד: *Leiderer et al.* [11-13] הצליחו לצפות בחדירה של שטף דנדריטי לאחר שחיממו בעזרת פולס לייזר איזור קטן של פילם $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) דק לטמפרטורות שמעל למעבר הפאזה; מפולות השטף הדנדריטיות פרצו דרך האיזור שחומם. על אף ניסיונות חוזרים ונשנים שבוצעו ע"י קבוצות מחקר שונות לא הושגה הצלחה ביצירת מפולות השטף הבלתי יציבות ב-YBCO ע"י העלאת שדה חיצוני בלבד, באופן בו נוצרו תצורות דנדריטיות במוליכי העל הקונבנציונאליים.

בעבודה הנוכחית אנחנו מראים לראשונה חדירות שטף בתצורות דנדריטיות בפילמים דקים של YBCO שנוצרו בעת העלאת שדה המגנטי החיצוני בלבד. בניסויים שלנו, בשונה מעבודות קודמות, השדה המגנטי החיצוני עולה בקצב מהיר במיוחד. לצורך הניסוי ניצלנו מערכת מגנטו-אופטית חדישה שפותחה לאחרונה במעבדה. מערכת זו מאפשרת העלאת שדות מגנטיים בקצבים מהירים מאוד, עד 3 kT/s , והדמייה של תצורות השטף בקצב של עד $68,000$ תמונות לשנייה. ההעלאה המהירה של השדה היא כנראה המקור לתצורות השטף הדנדריטיות שנצפו כאמור לראשונה בעבודה זו. במסגרת העבודה חקרנו את התנאים הנדרשים לקיומה של התופעה,

ובמיוחד את גבולות הטמפרטורה וקצבי השדה בעבורם יופיעו תצורות דנדריטיות. מצאנו גבול עליון לטמפרטורה בה יופיעו הדנדריטים וסף תחתון, \dot{B}_{th} , לקצב העלאת השדה מתחתיו התופעה נעלמת. התלות שמצאנו ל- $\dot{B}_{th}(T)$ מתאימה איכותית לניבויים תאורטיים הנמצאים בספרות [14].

חקרנו גם את השפעת המצע עליו גודל ה-YBCO: מדדנו דגמי YBCO שגודלו על ארבעה סוגים של מצעים: Sapphir, STO, YSZ, ו-Magnesia. חדירת השטף בתצורה הדנדריטית נראתה בכל הדגמים כאשר התנאים להתרחשות החדירה השתנו ובחלק מן הדגמים היה אף צורך בפגמים מלאכותיים אשר רק בעזרתם התקבלו מפולות השטף בדגם. אנחנו מראים שההבדלים בין הדגמים הם תוצאה של הבדלים בהולכת החום של המצע; ככל שפיזור החום של הדגם טוב יותר, חזית השטף יציבה יותר.

מצאנו גם שאופיין של התצורות הדנדריטיות משתנה משמעותית עם השינויים בטמפרטורה. במיוחד, עם העלייה בטמפרטורת הדגם חלה ירידה במספר מקורות הפריצה של השטף וכן ירדו גם מספר הענפים היוצאים מכל ממקור ומקור. לעומת זאת אורכו ורוחבו של כל ענף באופן אינדיבידואלי עלה עם עליית הטמפרטורה, עובדה המשקפת כנראה את זחילת השטף המוגברת בטמפרטורות הגבוהות. בנוסף, מצאנו חסם עליון ($\sim 15 \mu s$) למשך הזמן בהם הדנדריטים מתפתחים בדגמי ה-YBCO שנבדקו.

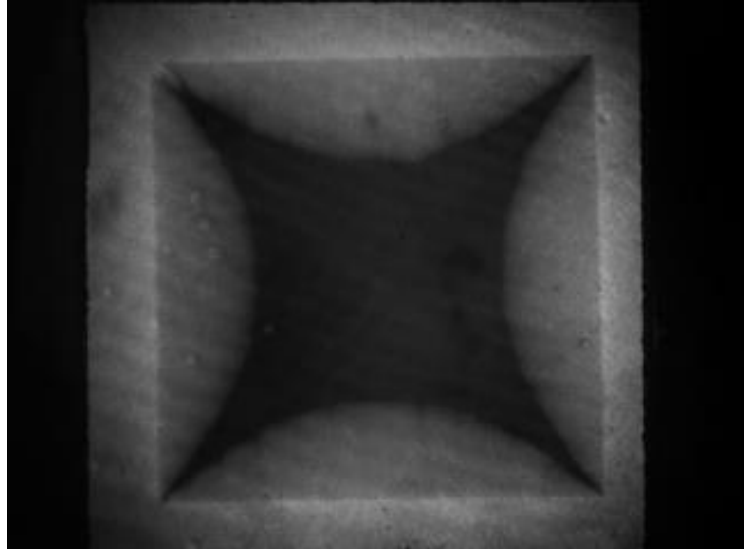
ממצא חשוב נוסף של העבודה הוא הגילוי של נזקים בלתי הפיכים בדגם, נזקים שנוצרו כתוצאה מהחשיפה המהירה של הדגם לשדה ומפולות השטף שנוצרה בעקבות חשיפה זו. מדידות מיקרוסקופיות הראו שהנזקים, הנראים כיתעלותי שאורכן עשוי להגיע למילימטר ורוחבן כמיקרומטר, הן תוצאה של התכה מקומית של ה-YBCO. נזקים פרמננטים כאלה לא נצפו בעבר במוליכי-על כמו MgB_2 , Nb, ו-NbN למרות שפריצות דנדריטיות בהם שכיחות למדי. אנו מעריכים כי הנזקים, שנצפו עד היום רק ב-YBCO, מתרחשים בגלל החימום המוגבר הנגרם מקצב השינוי המהיר של השדה המגנטי ומקצב איטי של דיפוזית החום בחומרים אלו.

התוצאות שהתקבלו בעבודת המחקר מהוות אינדיקציה ברורה לכך שתופעת אי היציבות התרמו-מגנטית היא תופעה גלובאלית המשתייכת לכלל מוליכי העל. התוצאות הנסיוניות נמצאות בהתאמה איכותית עם ניבויים של התאוריות העוסקות בנושא. חשיבות נוספת של עבודת המחקר הינה בפן האפליקטיבי; ביישומים המתבססים על חומרים מוליכי-על החומר חייב לשמור על יציבות כך שהתנהגותו תהיה צפויה מראש. ברור, איפא, שפריצות שטף בלתי יציבות לתוך החומר מהוות איום על תפקודם הנורמלי של האפליקציות הללו. יתר על כן, פריצות השטף אף משאירות אחריהן נזקים בחומר העלולות להרוס כליל התקן המבוסס על מוליכי העל. תוצאות המחקר ומסקנותיו מספקים, איפא, מידע חשוב בנוגע לתכנון אפליקציות עתידיות באמצעות חומרים מוליכי על.

פרק 1 – מבוא

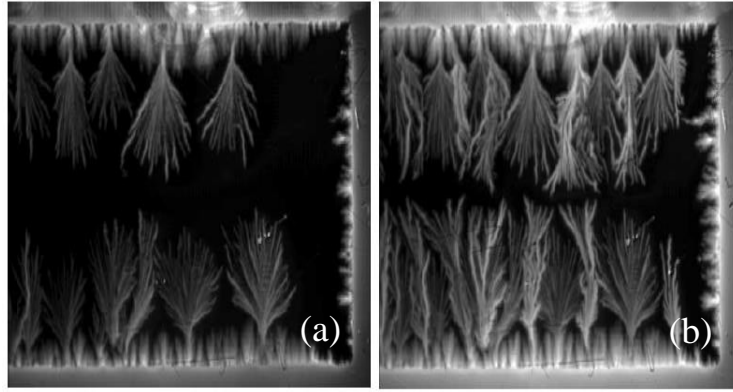
חומר מוליך-על הנחשף לשדה מגנטי מייצר זרמי מיסוך המונעים חדירה של קווי השדה לתוך החומר. תופעה זו המוכרת כאפקט מייסנר מהווה ביטוי לאחת התכונות הבסיסיות של מוליכי העל, היינו לדיאמגנטיות המושלמת. במוליכי על מסוג II [16,15] המיסוך המגנטי נשמר עד לשדה הקריטי הראשון, H_{c1} , ולאחריו תתאפשר חדירה חלקית של קווי השטף אל תוך הדגם. מצב זה מוכר כ"פאזה המעורבת" (mixed state) שבה מתאפשרת חדירה של השטף המגנטי לתוך מוליך העל במנות קוואנטיות המכונות פלקסונים (fluxons). כל פלקסון מאופיין ע"י קוונט של שטף מגנטי $\Phi_0 = 2.10^{-7} \text{ Gcm}^2$ וליבה נורמלית בעלת רדיוס השווה לאורך הקוהרנטיות, ξ . ליבתו של כל פלקסון מוקפת זרמי מיסוך הדועכים אקספוננציאלית בהתאם לעומק החדירה, λ , וכיונם של זרמים אלו נקבע בהתאם לשדה המגנטי החיצוני.

דגמים מוליכי-על אינם נקיים מפגמים. לפגמים אלה יש השפעה על אופן חדירת השדה המגנטי לתוך החומר מוליך העל כיוון שהם יוצרים מרכזי לכידה (pinning centers) עבור הפלקסונים. בנוכחותם של פגמים הפלקסונים אינם נעים בחופשיות בגלל העדיפות האנרגטית שיש להם בהיותם במרכזי הלכידה המפוזרים בדגם. כל מרכז לכידה שכזה מאופיין בכוח לכידה, F_p , המונע מהפלקסון לנוע ומאפשר לזרם לזרום בדגם ללא איבודים. אולם, הזרם עצמו מפעיל על הפלקסונים כוח לורנץ, F_L , הקשור לצפיפות הזרם בדגם ע"י $F_L = J \times \Phi$. כאשר צפיפות הזרם מגיעה לסף הזרם הקריטי, J_c , כוח לורנץ משתווה לכוח הלכידה, F_p , והפלקסונים יכולים להתגבר על כוח זה ולנוע בדגם. מצב זה הוא המצב הקריטי וכאשר צפיפות הזרם בדגם עולה על הזרם הקריטי, J_c , אזי הפלקסונים ינועו בדגם במהירות V וייצרו שדה חשמלי $E = V \times \Phi$. בעזרת מודל Bean [17], המתאר את המגנטיזציה בדגם בנוכחות כוחות לכידה, ניתן לקבל את צפיפות הזרם הקריטית של הדגם, J_c , מתוך מדידות מגנטיות. המודל הנ"ל מגדיר את השינוי (גרדיאנט) המקסימלי של האינדוקציה המגנטית בדגם בעזרתו מתקבל $J_c = \nabla \times B$. האינדוקציה המגנטית המשקפת את חדירת השטף המגנטי לדגם מוליך העל מאופיינת בכניסה של חזית גל אחידה ויציבה אשר מתקדמת אל פנים הדגם תוך כדי התהליך של העלאת השדה המגנטי החיצוני (איור 1.1).



איור 1.1: הדמיה מגנטו-אופטית של דגם YBCO על מצע STO הממחישה את חדירת השטף המגנטי בעל החזית האחידה. הדגם קורר אל מתחת לטמפרטורה הקריטית ונחשף לשדה מגנטי של 60 mT. עוצמות האור השונות בכל נקודה בדגם ממחישות את עוצמות השדה השונות בדגם; עוצמת אור גבוהה יותר מתאימה לעוצמת שדה גבוהה יותר. (הנקודות הנראות בצד השמאלי של הדגם הינם פגמים על האינדיקטור).

חזית השטף המגנטי המגיעה אל הדגם באה באינטראקציה עם שפת הדגם המהווה מחסום אנרגטי עבור השטף בכניסתו אל הדגם. מחסום זה נקרא מחסום השפה [18]. שפת הדגם הינה בדרך כלל אי-הומוגנית, ולכן צפיפות השטף על השפה אף היא משתנה [19]. בהתאם לאינטראקציית השפה עם השטף נוצרים אזורים אשר צפיפות השטף המגנטי בהם גבוהה יותר. בעקבות היווצרות האזורים הללו חזית השטף המגנטי עשויה לאבד את יציבותה, ותתקבל פריצה של שטף מגנטי אל תוך הדגם בתהליך המכונה תרמו-מגנטי. בתהליך זה תנועת הפלקסונים משחררת אנרגיה, מעלה נקודתית את הטמפרטורה ובכך מפחיתה את הלכידה עבור הפלקסונים באזור ומאפשרת להם לנוע. תנועה זו עשויה לגרום לחימום נוסף וחוזר חלילה. כתוצאה מהזן (feedback) חיובי זה, נגרמת מפולת של שטף מגנטי המתפתחת בערוצים שונים בדגם [20]. תופעות אלו של אי יציבות בחדירת השטף המגנטי אל פילמים דקים נצפו בעיקר במוליכי על 'קונבנציונליים' כמו MgB_2 [1-4], Nb_3Sn [5], Nb [6,7], NbN [8], YNi_2B_2c [9], ו- Pb [10], תוך שימוש בטכניקות מגנטו-אופטיות [21,22]. בפילמים אלו נצפו חדירות שטף בתצורות דנדריטיות ומאוצבעות המתפתחות משפת הדגם כפי שמתואר באיור מס' 1.2 [1].



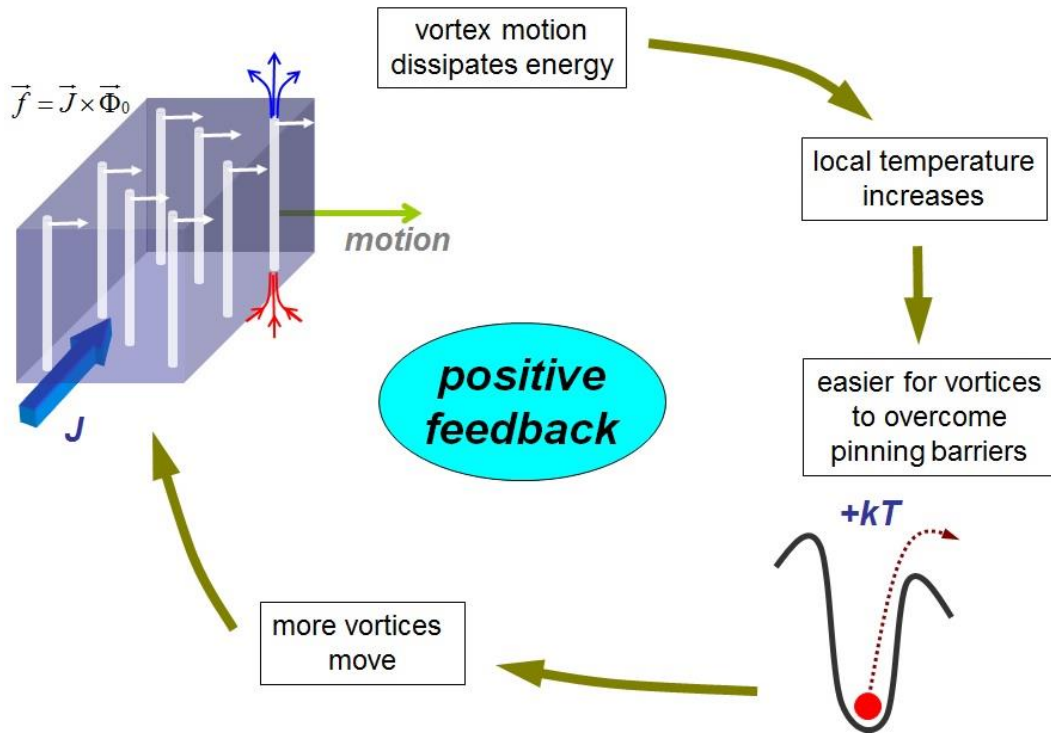
איור 1.2: הדמיה מגנטו-אופטית של פילים דק של MgB_2 שקורר ללא שדה לטמפרטורה של 3.6 K. התמונות נלקחו בנוכחות שדה מגנטי של 8 mT (a) ו 14 mT (b) המאונך לפני הדגם. ניתן להיווכח בתצורות שטף דנדריטיות הפורצות אל תוך הדגם. האזורים הבהירים יותר מצביעים על צפיפות שטף גבוהה יותר. [1].

מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות (HTS) הציגו יציבות גבוהה יותר לעומת אלו שהוזכרו לעיל. הסיבה ליציבות הגבוהה קשורה כנראה למוליכות הגבוהה שלהם במצב ה-flux flow; נרחיב על כך בהמשך העבודה. חדירת שטף בתצורות דנדריטיות ב-HTS הושגה בעבר רק ע"י קבוצת חוקרים אחת בלבד, של *Liederer et al.* מאוניברסיטת Konstanz שבגרמניה [11-13]. כדי להתגבר על היציבות של ה-HTS החוקרים הקרינו באמצעות לייזר אזור מסוים בדגם, וגרמו לאזור להתחמם ולצאת מתחום מוליכות העל, ובכך להוות כמקור מתוכו תפרוץ מפולת השטף המגנטי. למרות מאמצים ניסיוניים רבים של חוקרים אלה ושל אחרים, לא התגלו פריצות דנדריטיות בתנאים "רגילים", כלומר ע"י חשיפת הדגם לשדה מגנטי ללא זרז חיצוני ומלאכותי כפי ששימש הלייזר בניסוי של לידרר.

תיאורית אי-היציבות התרמו-מגנטית

אי היציבות התרמו-מגנטית מתפתחת כתוצאה מהפרעות לוקליות של מצב הפלקסונים בדגם במיקומים בהם מצויים פגמים בשפת הדגם (עדות לכך נראתה במחקר שמצא כי על אף שתצורות החדירה הלא יציבות השתנו בפרטיהן מניסוי לניסוי, מיקומי הפריצות הללו חזרו על עצמם לעיתים קרובות [23]). מיקומים אלו מביאים לכדי הצטברות השטף באזור, אשר בשלב מסוים מבצע פריצה אל תוך הדגם וגורם לחימום לוקלי. חימום זה מקטין את אנרגיית הלכידה של פלקסונים בסביבה המחוממת ואלה משתחררים וגורמים לתנועת שטף נוספת ששוב משחררת חום. הפידבק החיובי הנ"ל מביא לריכוך תרמי של מצב הפלקסונים בדגם, היחלשות של אנרגיית הלכידה שלהם, ולכן גורם לכך שחדירת השטף המגנטי המאופיינת בד"כ בחזית אחידה ויציבה נפרצת ומתקבלות תצורות שטף דנדריטיות לא יציבות. תהליך זה של אי היציבות התרמו-מגנטית מתואר סכמטית באיור 1.3.

Thermo-magnetic instability: Flux jump scenario



איור 1.3: תיאור תהליך אי היציבות התרמו-מגנטית המביא למפולת שטף מגנטי בתוך מוליך העל. תנועת הפלקסונים מביאה לפיזור אנרגיה הגורם לעלייה לוקאלית בטמפרטורה, עלייה זו מסייעת לפלקסונים להתגבר על מחסומי הלכידה וגורמת לתנועה נוספת של שטף. תנועת השטף יוצרת הפעלה של כוח לורנץ על פלקסונים נוספים אשר מתחילים את התהליך מחדש. [מתוך מצגת של Galperin, 2008].

המודלים התאורטיים המתארים את התופעה [24-29,14] מבוססים על משוואות מקסוול:

$$(1) \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

ועל משוואת הדיפוזיה של החום:

$$(2) \quad C(\partial T / \partial t) = \kappa \nabla^2 T + \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$$

במשוואות אלה \mathbf{B} ו- \mathbf{E} הם השדה המגנטי והחשמלי בהתאמה, μ_0 הוא פרמאביליות הריק, \mathbf{j} מתאר את צפיפות הזרם, C הינו קיבול החום ליחידת נפח, κ היא מוליכות החום ו- T הינה הטמפרטורה הלוקלית בדגם. על בסיס משוואות אלה, התאוריות מתארות מקדמי דיפוזיה חומנית ומגנטית הקשורים להתפשטות החום והאינדוקציה המגנטית בדגם, בהתאמה. הפרמטר העיקרי לבחינת היציבות של חזית השטף המגנטי נקבע ע"י היחס בין מקדמי דיפוזיה אלה. מקדמי הדיפוזיה, וכתוצאה מכך גם הפרמטר המכתיב את אי-היציבות, תלויים בפרמטרים חיצוניים (כמו

טמפרטורה) ובפרמטרים הקשורים לדגם (כמו המוליכות החשמלית של הדגם, σ , קיבול החום ליחידת נפח, C , והמוליכות התרמית של הדגם, κ).

המודלים התיאורטיים [24-29,14] עסקו בשאלות רבות שהתעוררו תוך חשיפת תופעת אי-היציבות. שאלות כגון: (i) מהם התנאים להתרחשות התופעה? (ii) איך משפיעים טמפרטורת הדגם, השדה המגנטי החיצוני, וקצב שינוי השדה בזמן על ההתפתחות של אי-היציבות? (iii) האם ישנם סימנים מקדימים להתרחשות התופעה והאם ניתן להימנע ממנה? שאלות אלה ודומיהן העסיקו רבות את החוקרים ואלה ניסו להתמודד איתן והציגו תחזיות לתנאי הסף הדרושים להתרחשות פריצות השטף המגנטי אל הדגם. כך, למשל, קבוצת המחקר של ארנסון (Aranson) ושות' הציעה מודל וסימולציות המתארות את תצורות השטף הדנדריטיות בפילמים דקים של מוליכי-על [14]. המודל שלהם התבסס אף הוא על הקשר בין הדיפוזיה התרמית והדיפוזיה המגנטית בדגם אך בשונה מן העבודות התאורטיות האחרות [24-29] קבוצה זו הביאה בחשבון גם את אי-הלוקליות של דיפוזיית השטף המגנטי המתרחשת בשכבות דקות של מוליכי-על. המודל הציג תחזית לקצב עליית שדה קריטי, \dot{B}_{th} , הדרוש להופעת הדנדריטים בדגם [14]:

$$(3) \quad \dot{B}_{th}(T) \propto \frac{1}{J_c(T) |\partial J_c(T) / \partial T|}$$

גודלו של הזרם הקריטי יורד עם הטמפרטורה. משוואה (3) מנבאת, איפא, שעם עליית הטמפרטורה סף הקצב המינימלי לעליית השדה שמאפשר הופעת אי-יציבות עולה גם הוא. כפי שנראה להלן, שיטת העבודה שלנו מאפשרת בחינה של מידת ההתאמה בין התחזית התאורטית לתוצאות הנסיוניות.

בעבודה זו אנו מדווחים לראשונה על ניסויים מוצלחים בפילמים דקים של YBCO בהן נצפתה פריצה של שטף מגנטי בתצורה דנדריטית כאשר הדגם כולו נמצא בפאזה העל מוליכה (כלומר, ללא חימום לוקלי לטמפרטורות שמעל למעבר). באמצעות שימוש בטכניקת המגנטו-אופטיקה וחשיפה לשדות מגנטיים המשתנים בקצב מהיר התקבלו מפולות שטף בעלות תצורות דנדריטיות. מעניין לציין שצורות דנדריטיות ידועות בשטחים אחרים. אחד המפורסמים, ואולי הראשון בו נראו תצורות כאלה, הוא התצורה שבאה בעקבות פריקת מטענים בברקים. (תצורות אלה נקראות על שם ליכטנברג [31,30] שעסק בחקר פריקות מתח גבוה במבודדים. גם במקרה של פריקת המתח במבודדים וגם במקרה שלנו - dB/dt גבוה המייצר שדה חשמלי לוקאלי - מדובר בהפרש פוטנציאל גדול מאוד בין שתי נקודות שמצליח להביא לפריצה המתפתחת בתצורות כאוטיות תוך התגברות על בורות פוטנציאל לוקאליים). התוצאות שיתוארו בעבודה זו מראות

שחדירה של שטף בתצורות דנדריטיות אינם נחלתם של מוליכי-על בטמפרטורות נמוכות בלבד אלא זוהי תופעה גלובלית המתרחשת בכל מוליכי העל. כמו כן, במחקר זה נבחן ונציג את התנאים בהן התופעה מתרחשת, לרבות תחומי הטמפרטורות והשינויים שמתרחשים בטמפרטורות השונות, תנאי השדות וקצבי עליית השדות הנדרשים לקיום הפריצות. נבדוק גם את השפעות המצע עליו מגודלת השכבה מוליכת העל, וכן עובי השכבה עצמה על חדירת השטף הבלתי יציבה, ובנוסף נציין גם סף תחתון למשך זמן ההתרחשות של הפריצות הדנדריטיות. עניין נוסף בעל חשיבות שנציג בעבודה קשור לנזקים הנגרמים לדגמים במהלך המדידות כתוצאה מפריצות השטף הבלתי יציבות.

העבודה שלהלן מאורגנת באופן הבא. בפרק הבא, פרק 2, נציג את המערכת הניסיונית והדגמים ששימשו במחקר זה. פרק 3 יכלול את תוצאות המדידות שהתקבלו במהלך עבודת המחקר. הפרק יכלול גם השוואה של התוצאות לתוצאות מן העבר במוליכי-על קונבנציונליים כמו גם לפרדיקציות התאורתיות, וכן דיונים בגורמים ובהשלכות של התוצאות שהתקבלו. פרק 4 יכלול את סיכום העבודה ומסקנותיה.

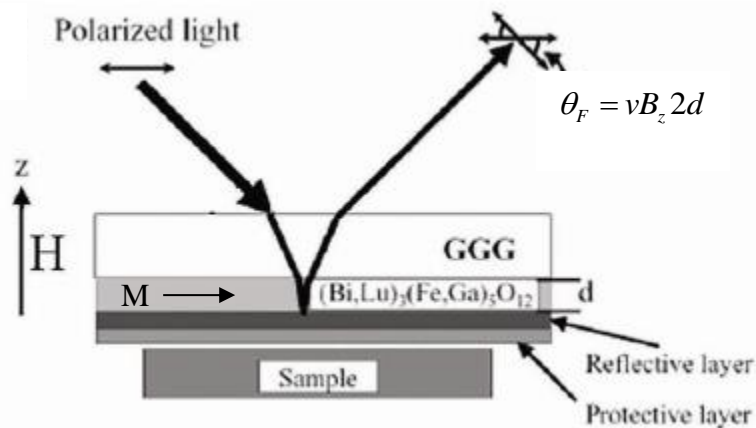
פרק 2 - המערכת הניסיונית

מערכות המדידה המגנטיות המקובלות כיום מאפשרות ברובן מדידה מגנטית "גלובאלית" של הדגם הנמדד, כלומר הן מסכמות את הסיגנל המגנטי המתקבל מכל הדגם. לעומת זאת, בעבודה זו אנו משתמשים במערכת מדידה מגנטו-אופטית אשר באמצעותה ניתן למדוד את התפלגות האינדוקציה המגנטית הלוקאלית בדגם, ואת התפתחותה של אינדוקציה זו בזמן. בפרט, המערכת שלנו מאפשרת מדידה דינאמית מהירה מאוד, וזאת בעזרת רכיבים ייחודיים אודותיהם אפרט בהמשך הפרק. היות ואנו חוקרים את אופי החדירה של השטף המגנטי אל תוך דגמים על-מוליכים, מדידות לוקאליות ודינאמיות של התפלגות השטף בדגם הינן המתאימות ביותר לצורך מחקר זה. בעבודה זו אנו משתמשים בדגמים במוליכי-על מסוג $YBa_2Cu_3O_x$ עליהם נפרט בסיום הפרק.

2.1 המערכת המגנטו-אופטית

המערכת המגנטו-אופטית מתבססת על אפקט פאראדיי המבטא אינטראקציה בין אור מקוטב לשדה מגנטי. ישנם חומרים מגנטיים מסוימים, המכונים חומרים פעילים מגנטו-אופטית [32], אשר אור מקוטב העובר דרכם ישנה את זווית הקיטוב שלו בהתאם לשדה מגנטי שהחומר מזהה. כלומר, זווית הסיבוב של מישור הקיטוב של האור המקוטב העובר בתוך החומר הפעיל תשתנה באופן הבא - $\theta_F = \nu B_z d$. כאשר ν הוא קבוע Verdet המבטא את מידת ההיענות של החומר לסיבוב מישור הקיטוב, B_z הינו השדה המגנטי המאונך לשכבה הפעילה ו- d הינו עובי השכבה הפעילה מגנטו-אופטית. רגישותם של חומרים אלו היא לוקאלית, דבר המאפשר להשתמש בהם גם למיפוי של האינדוקציה המגנטית בחומרים אשר אינם פעילים מגנטו-אופטית בעצמם, וזאת באמצעות הצמדת שכבה פעילה שכזו ("אינדיקטור") אל דגם אותו אנו מעוניינים למדוד. בדגמים הרלבנטיים לעבודה זו (דגמים מוליכי-על) על האינדיקטור להיות גדול מגודל הדגם הנמדד, כך שגם השטף המגנטי הנמצא מחוץ לגבולות הדגם, כתוצאה מזרמי המיסוך על שפת הדגם, יזוהה על ידי האינדיקטור. בעבודה זו האינדיקטור הוא פילם המורכב מהסגסוגת Bi

במישור הפילם. הפילם גודל על שכבה של Gallium Gadolinium Garnet (GGG) שקופה בעובי של 0.2-0.3 mm [33,32]. עובי השכבה הפעילה מגנטו-אופטית באינדיקטור הוא בין 0.1-10 μm , וסף הרגישות שלו לשדות המגנטיים היא באזור ה-1000 גאוס (0.1 טסלה) בהם הפילם מגיע למצב רוויה. במבנה הכולל של האינדיקטור ישנן גם שתי שכבות נוספות, האחת היא שכבה מראתית דקה (מאות ננו מטרים) העשויה מאלומיניום ונמצאת מתחת לשכבה הפעילה לצורך החזרה של האור אל השכבה הפעילה ואל המיקרוסקופ, והשנייה היא שכבת הגנה מ- TiO_2 בכדי להגן על האינדיקטור מפני שריטות.



איור 2.1: תיאור מבנה האינדיקטור בעל מומנט מגנטי מישורי המונח על הדגם, ותיאור מסלול האור המוחזר ממנו [34].

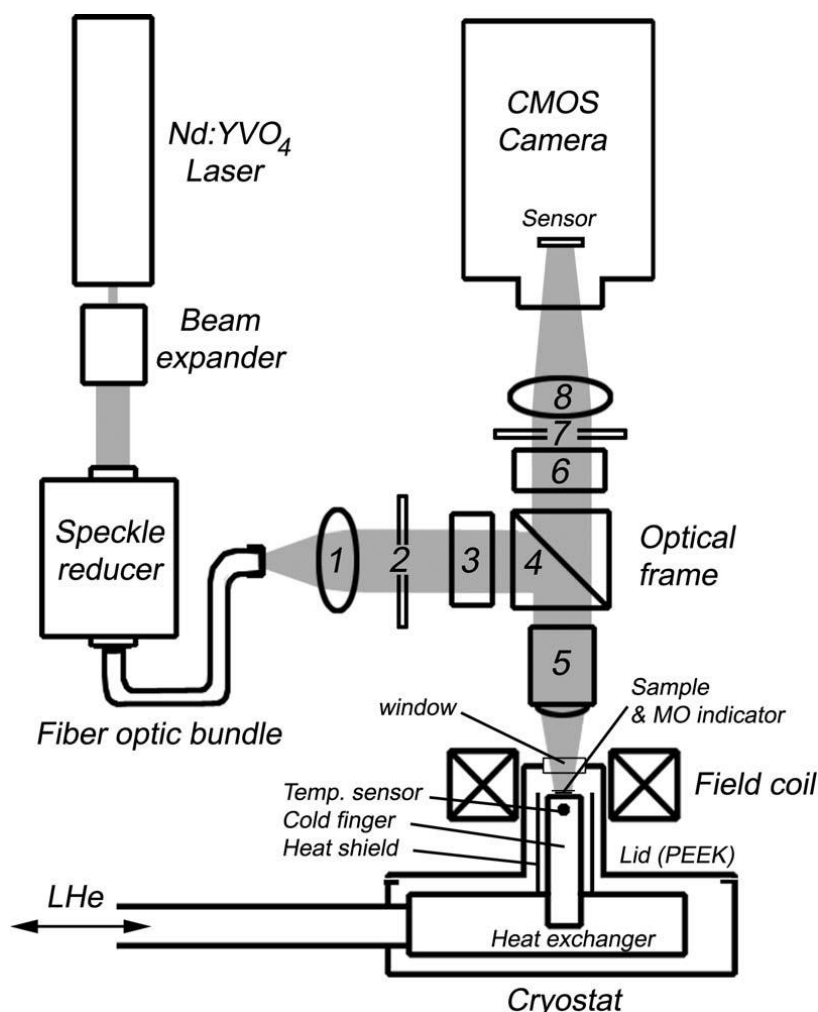
איור 2.1 מתאר סכמתית את מבנה האינדיקטור ואת מיקומו ביחס לדגם. במהלך המדידה, אור מקוטב מגיע במאונך אל האינדיקטור ועובר דרך שכבת ה-GGG אל השכבת החומר הפעיל. במהלך התקדמות האור בתוך השכבה הפעילה זווית הקיטוב של האור משתנה בהתאם למומנט המגנטי האנכי באינדיקטור, M_z , אשר מקביל לכיוון ההתקדמות של האור. מומנט מגנטי זה נקבע לפי רכיב האינדוקציה המגנטית הלוקאלית בדגם, B_z , הנוצר כתגובה לנוכחותו של שדה מגנטי חיצוני, H_z . האור העובר בשכבה הפעילה מוחזר מהשכבת האלומיניום ועובר שוב דרך החומר הפעיל, כך שגודל האפקט מוכפל והשינוי בזווית הקיטוב יהיה $\theta_F = vB_z 2d$. הרזולוציה המרחבית במדידות נקבעת לפי גובהו של האינדיקטור מעל הדגם כאשר הצמדה של האינדיקטור אל פני הדגם יכולה להביא לרזולוציה מרחבית של כ-1 μm . ראוי לציין שרזולוציה זו ניתנת לשיפור; Johansen וקבוצתו הצליחו כבר להראות בעבר, ע"י צפייה בפלקסונים בודדים [35], כי באופן עקרוני הרזולוציה המרחבית מוגבלת ע"י אורך הגל של האור המקוטב.

למערכות מגנטו-אופטיות 'קונבנציונליות' מצורפת מצלמת וידיאו המאפשרת מעקב אחר הדינמיקה של המצב המעורב במוליכי-על. מערכות כאלה סיפקו אינפורמציה חשובה במחקרים רבים, הן בקבוצה שלנו [36-46] והן בקבוצות אחרות [1,2,47-49]. עם זאת, מערכות אלה מוגבלות

ברזולוציית הזמן שלהן לכ-25 תמונות לשנייה. לאחרונה, פיתחנו מערכת מגנטו-אופטית ייחודית המאפשרת הדמייה בקצב של כ-68,000 תמונות בשנייה [50]. אחת מתכונותיה החשובות של מערכת חדשה זו היא האפשרות להעלות השדה המגנטי בקצב של עד 3,000 טסלה לשנייה. מערכת זו, בה השתמשנו במחקר הנוכחי, מתוארת בסעיף הבא.

2.2 מבנה המערכת הניסיונית

איור 2.2 מתאר סכמתית את מרכיבי המערכת הניסיונית בה השתמשנו. בנוסף לאינדיקטור, המערכת כוללת מצלמה מהירה, קריאוסטט לקירור הדגמים, סליל להפעלת שדה מגנטי חיצוני, מערך רכיבים אופטיים המשמש כמיקרוסקופ, ולייזר כמקור האור.

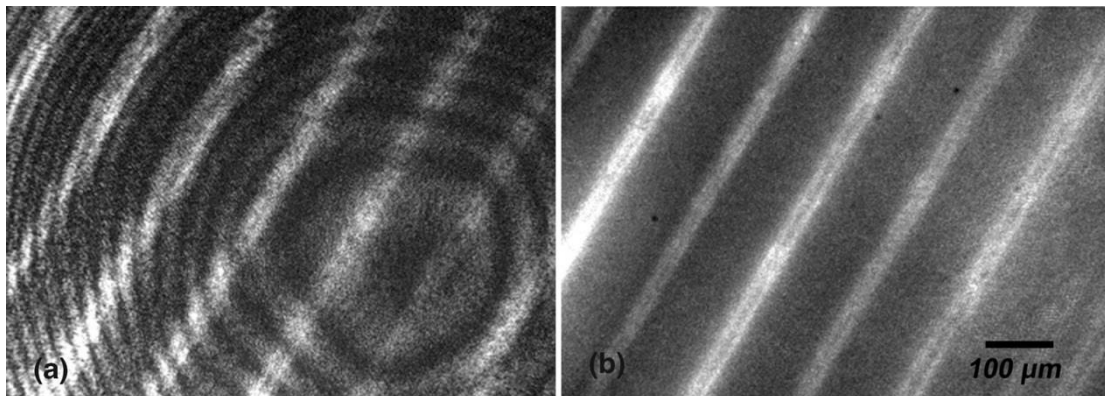


איור 2.2: תיאור סכמתי של מבנה המערכת בה השתמשנו בעבודה זו. המערכת כוללת את הלייזר, המצלמה, הקריאוסטט, הסליל להפעלת השדה החיצוני, ומערך של רכיבים אופטיים: (1) collimating lens, (2) iris, (3) polarizer, (4) beamsplitter, (5) objective, (6) analyzer, (7) iris ו- (8) imaging lens. [50]

המערכת הניסיונית [50] המתוארת באיור 2.2 כוללת:

1. מערך רכיבים אופטי המשמש כמיקרוסקופ מקוטב: המערכת כוללת סט רכיבים אופטיים לרבות עדשות וחרירי כניסה ויציאה, מקטבים, אובייקטיב ומפצל קרניים המסודרים בהתאם למתואר באיור, ומרכיבים מיקרוסקופ אופטי בעל אור מקוטב באמצעותו נתבונן על הדגם.

2. לייזר אור ירוק עוצמתי: Neodymium-doped yttrium orthovanadate (Nd:YVO₄), לזירה פולסית (Q-Switch, 10 ns pulse width), המספק שני אורכי גל של 1064 nm ו-532 nm. ההספק המקסימאלי הממוצע של 1 W ב-532 nm (50 μJ/pulse), מתרחש בתדירות של 20000 pulses/sec, ודועך ל-20 μJ/pulse בהעלאת התדירות ל-30 kHz. הכללת הלייזר הנ"ל במערכת אופטית מכניסה סיבוכיות של התאבכויות ורעשים (כדוגמת ה-speckle pattern), אשר מורידים דרסטית את איכות התמונה. כדי לפתור בעיה זו השתמשנו בהתקן ייעודי SK11 Speckle Reducer. ניתן להיווכח באופן השפעתו של ההתקן על התמונה המתקבלת במדידה באיור 2.3, תמונה המתקבלת ממדידה של ה-bar-code בכרטיס אשראי. איור 2.3(a) מראה תמונת הדמייה של ה-bar-code בלי השימוש בהתקן; התמונה רועשת ובעלת תבניות התאבכות המפריעות למדידה. איור 2.3(b) מראה אותה הדמייה עם שימוש ב-Speckle Reducer; התמונה המתקבלת הומוגנית ואיכותית יותר.



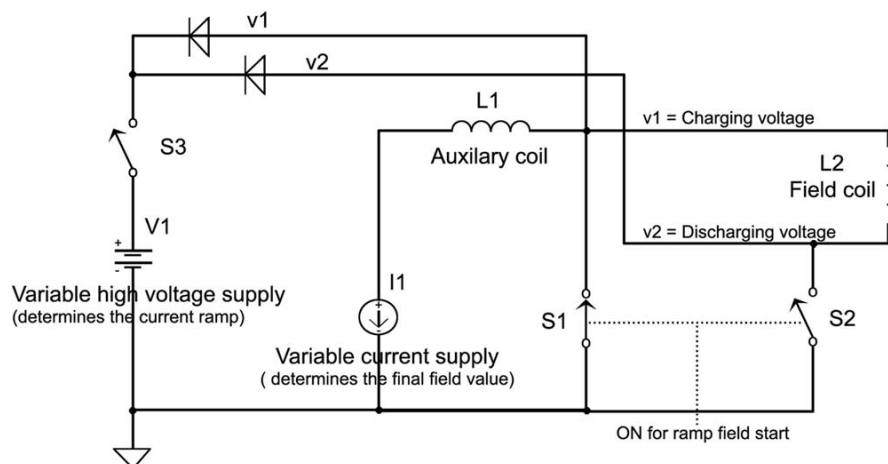
איור 2.3: השוואה איכותית של התמונה המתקבלת בהדמיה מגנטו-אופטית, ללא (a) ועם (b) שימוש בהתקן ה-Speckle Reducer. לצורך השוואה נבחנה התפלגות השטף המגנטי בכרטיס אשראי. הפסים הבהירים בתמונה הינם קוד הברקוד המגנטי של כרטיס האשראי. [50]

הסיבה העומדת מאחורי הבחירה לשימוש בלייזר פולסי ועוצמתי קשורה לצורך בהדמיה דינמית ומהירה ע"י הוספה של מצלמה מהירה המסוגלת לצלם מספר רב של תמונות בשנייה. כלומר, בעת חיבור של מצלמה מהירה למערכת המדידה, נוכל לצלם את השינויים בהתפתחות שטף מגנטי על הדגם המבוקש כתלות בקצב הצילום של המצלמה. אולם, מצלמה בעלת קצב צילום גבוה תזדקק לעוצמה גבוהה של אור, וזאת כיוון שכתוצאה מקצב צילום מהיר זמן החשיפה של כל תמונה ותמונה הוא מוגבל. על מנת

שהמצלמה תוכל לאסוף מספיק אור, כדי שהתמונות המתקבלות במדידה יהיו ברורות ואיכותיות, יש צורך במקור לייזר עוצמתי. נוסף על כך, לייזר שהוא גם פולסי מאפשר לסנכרן בין קצב הצילום לבין קצב הפולסים, דהיינו הלייזר הפולסי מאפשר לשלוט במספר הפולסים הנכנסים בכל צילום, ובכך לשמור על עוצמה קבועה של אור בכל תמונה.

3. מצלמת CMOS מהירה: מצלמת Phantom V210. המצלמה מחוברת ליציאת המיקרוסקופ כדי לאפשר שמירה של תוצאות ההדמיה המגנטו-אופטית, ומתן אפשרות לעיבוד הנתונים בשלב מאוחר יותר. המצלמה הנייל, אשר טכנולוגית סנסור ה-CCD השכיח, בעלת שלה מאפשר קריאה מהירה יותר של המידע בהשוואה לסנסור ה-CCD השכיח, בעלת יכולת צילום של 2190 פריימים בשנייה עבור תמונה מלאה של 1280x800 פיקסלים, ואילו בהקטנת המסגרת (השקולה להקטנת מספר הפיקסלים) קצב הצילום עולה מהותית, לדוגמא עבור מסגרת של 360x240 פיקסלים קצב הצילום יכול להגיע עד 20000Hz (כל מסגרת תהיה בעלת הגבלה לקצב צילום בהתאם למספר הפיקסלים שלה).

4. מערך סלילים להפעלת שדה מגנטי חיצוני: תכונה בעלת חשיבות גבוהה במערכת הניסיונית המאפשרת מדידות דינמיות היא האפשרות להפעלת שדה מגנטי חיצוני בקצב מהיר התואם ליכולות המצלמה. לפיכך קיימת במערכת זו תת מערכת המורכבת משני סלילים וספק כוח אשר מסוגלים לספק שדה מגנטי חיצוני בקצב עלייה מהיר מאוד. ע"פ חוק לנץ, ידוע כי כל סליל אשר הזרם העובר בו משתנה בפתאומיות ייצר השראות כנגד השינוי במעגל. על כן, בתכנון המערכת נלקחו בחשבון תכונות ההשראות של הסלילים והסביבה שלהם כך שלא תהיה להם השפעה מהותית המתנגדת לעליית השדה המהירה ומאיטה את עליה זו. מעגל הסלילים הקיים במערכת הניסיונית מתואר באיור הבא:



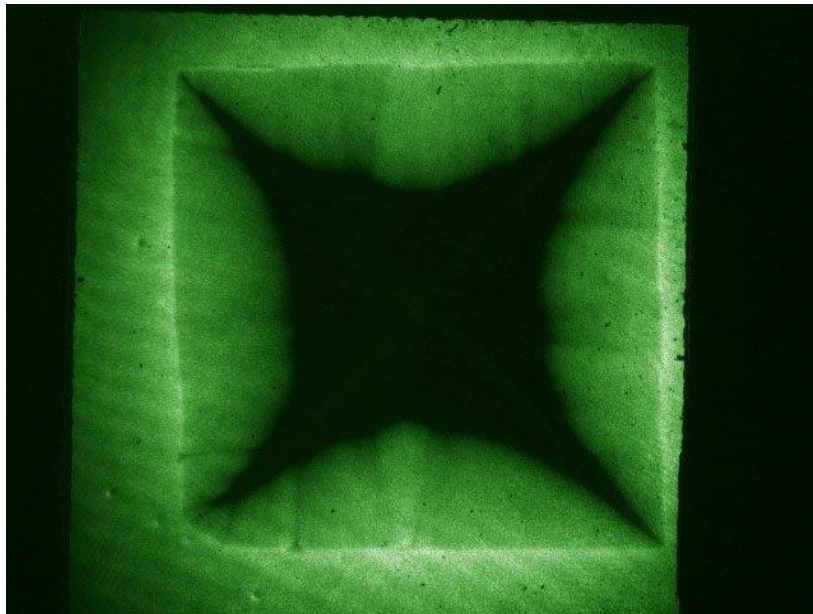
איור 2.4: תיאור סכמתי של מערך הסלילים המשמש להפעלת השדה החיצוני במערכת. ספק הזרם I1 טוען את סליל L1 האוגר את הזרם (בשלב זה סליל השדה L2 מנותק), לאחר מכן מפסק S2 נסגר (S1 נפתח בו-זמנית) ומתחיל להבנות מתח על סליל השדה L2 בקצב של V/L עד למקסימום הרצוי. לשליטה בקצב עליית השדה מחובר למעגל ספק מתח משתנה נוסף V1 באמצעותו ניתן לקבוע את קצב עליית הזרם במעגל. [50]

באיור 2.4 מתואר המבנה של מערכת הסלילים המספקת את השדה החיצוני במערכת הניסיונית. העיקרון העומד מאחורי מבנה זה הינו אגירה של אנרגיה חשמלית בסליל בעל השראות גדולה מאוד ($L_1=82\text{mH}$) וטעינתו בזרם גבוה, ואחר כך מחברים את סליל האגירה לסליל השדה אשר הדגם נמצא במרכזו והוא בעל השראות נמוכה ($L_2=1.7\text{mH}$). זמן עליית סליל השדה למתח (שדה) הרצוי נקבע לפי היחס V/L , ומאפשר העלה מהירה מאוד של הזרם בסליל השדה. המערכת הניסיונית המתוארת כאן מסוגלת לייצר שדה חיצוני של עד 600 G בזמן של $20\ \mu\text{s}$, כלומר קצב עליית השדה המקסימלי אותו המערכת מסוגלת לספק עומד על 3 kT/s . האפשרות לשליטה על קצב עליית השדה נקבעת בעזרת ספק מתח משתנה המחובר במקביל לסליל השדה, על כן הספק המשתנה קובע את קצב עליית הזרם בסליל השדה ובכך את קצב עליית השדה המגנטי החיצוני. למרות מערך הסלילים המתואר כאן יש לקחת בחשבון שישנם גורמים נוספים העלולים להשפיע ולהאט את קצב עליית השדה המגנטי, למשל קריאוסטט מתכתי אשר הדגם מונח בתוכו לצרכי קירור. לשם התמודדות עם הבעייתיות הנ"ל, במערכת המגנטו-אופטית המשמשת לעבודה זו הותקן קריאוסטט בהתאמה אישית.

5. קריאוסטט: בכדי לבצע מדידות על חומרים מגנטיים הדורשים קירור מתחת לטמפרטורת סף מסוימת, כדוגמת חומרים פרומגנטיים או חומרים מוליכי-על הותקן במערכת קריאוסטט (תא) תוצרת Oxford instruments לזרימה מתמשכת של הליום נוזלי. המבנה הפנימי של התא (כפי שניתן לראות באיור 2.2) כולל אצבע קרה אשר הדגם מוצמד בראשה, סביבה ישנו מגן קרינה, והתא נסגר מלמעלה ע"י כיסוי עם חלון בחלקו העליון המאפשר התבוננות על הדגם מבחוץ. בעת שימוש בשדה מגנטי לא קבוע בסביבה של חומרים מתכתיים ייוצרו בחלקי המתכת זרמי מערבולות המייצרים שדה מגנטי הפוך בכיוונו לשדה המופעל. למניעת ההפרעות לשדה המגנטי נעשו מספר מודיפיקציות בקריאוסטט. ראשית, האצבע הקרה המיועדת להעברת החום (הקור) אל הדגם שבד"כ עשויה מנחושת הוחלפה באצבע העשויה מספיר. נוסף על כך, מגן הקרינה סביב האצבע הקרה הינו מחורץ, וכן הכיסוי של הקריאוסטט עשוי פלסטיק. סף הקירור האפשרי במערכת הינו 7 K בראש האצבע (מיקום הדגם) ו- 5 K בבסיסה, והיא נשלטת ע"י שני סנסורים הנמצאים במיקומים זהים כשאחד מהם משמש גם כמחמם התנגדותי.

לסיכום, האור היוצא ממקור הלייזר נכנס למערכת ומקוטב לינארית במקטב הנמצא בכניסה למערכת (Polarizer). לאחר מכן הוא מתקדם בתוך המיקרוסקופ תוך שהוא עובר במערך של רכיבים אופטיים שאינם משפיעים על קיטובו, ודרך חלון הקריאוסטט. האור המקוטב פוגע באינדיקטור המונח על הדגם, ומוחזר ממנו כאשר זווית הקיטוב משתנה לוקאלית בהתאם להתפלגות השדה על הדגם. האור המוחזר עובר דרך המיקרוסקופ אל עבר המצלמה הנמצאת ביציאה, תוך מעבר במקטב נוסף (Analyzer) המאונך למקטב בכניסה. התמונה המתקבלת תהא בהתאם לשינויים בקיטוב האור, כך שלמשל עבור נקודה על האינדיקטור בה האינדוקציה הייתה אפס הפיקסל יראה חושך, ואילו במקומות אשר הייתה אינדוקציה הפיקסלים יראו עוצמת אור

גבוהה יותר בפרופורציה מתאימה. בצורה הזו תתקבל תמונת ההתפלגות של השטף המגנטי על הדגם הנמדד. המערכת הניסיונית המתוארת מתאימה מאוד למחקר העוסק בדינאמיקה של שטף מגנטי בעל מוליכים בטווח רחב של טמפרטורות, ובחשיפה לשדות מגנטיים חיצוניים משתנים. התמונות המתקבלות במדידות מציגות תמונה איכותית של התפלגות האינדוקציה המגנטית וזרמי השפה על הדגם. דוגמא להדמיה מגנטו-אופטית הנעשתה במערכת עבור על-מוליך מסוג YBCO מוצגת באיור 2.5. האיור מתאר את התפלגות האינדוקציה המגנטית בדגם YBCO שקורר ללא שדה לטמפרטורה של 7 K ולאחר מכן נחשף לשדה של 60 mT. עוצמת האור מייצגת עוצמות שונות של השדה המגנטי בדגם. ניתן להבחין בתצורת חדירה קלאסית של חזית גל אחידה אל תוך הדגם, כאשר מרכז הדגם נשאר ממוסך מהשטף מגנטי.



איור 2.5: תמונה מגנטו-אופטית של דגם YBCO ריבועי (4x4 mm) בעובי של 150 nm על מצע MgO, המראה את התפלגות האינדוקציה המגנטית בדגם. (תמונה דומה לדגם YBCO על מצע STO מופיעה באיור 1.1). הדגם קורר ללא שדה לטמפרטורה של 7 K ולאחר מכן נחשף לשדה של 60mT. עוצמת האור מייצגת עוצמות שונות של השדה המגנטי בדגם. ניתן להבחין בתצורת חדירה קלאסית של חזית גל אחידה אל תוך הדגם, כאשר מרכז הדגם נשאר ממוסך מהשטף מגנטי.

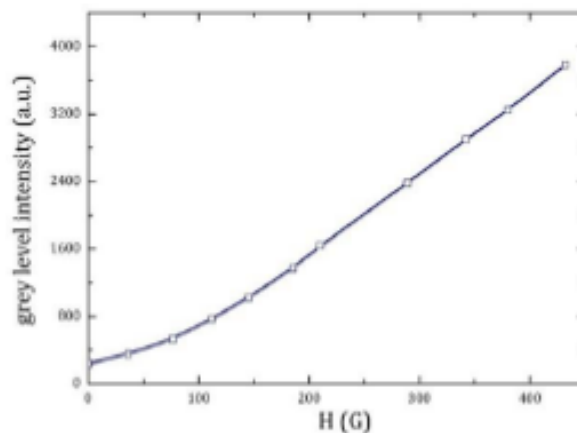
התמונה ממחישה את תצורת החדירה הקלאסית של שטף מגנטי בעל-מוליכים בהתאם למודל Bean, גבולות הדגם מובחנים ע"י טבעת בהירה בשל זרמי השפה, ומרכזו של הדגם, שם השדה המופעל ממוסך, מתקבל חושך. בכדי ללמוד מן התוצאות על תופעות פיסיקאליות דינאמיות הקשורות להתפתחות שטף המגנטי בעל-מוליכים יש לעשות אנליזה לתוצאות, לרבות המרה מהתפלגות של עוצמות אור להתפלגות שדה מגנטי ומעקב אחר השינויים בתנאים השונים. על ניתוח ועיבוד הנתונים נרחיב בפרק הבא.

2.3 ניתוח ועיבוד הנתונים

בעזרת תהליך כיוול של ההדמיה המגנטו-אופטית ניתן לתרגם את עוצמות האור המתקבלות לגדלים של אינדוקציה מגנטית, לוקאלית, ומשתנה בזמן. תרגום זה מאפשר ללמוד מתוך ההדמיות מאפיינים מגנטיים רבים של הדגמים הנמדדים. תהליך הכיוול מתבצע במספר שלבים: ראשית לוקחים סדרת תמונות כאשר צמצם המצלמה סגור אשר מטרתם תהיה מדידת הרעש האלקטרוני של המצלמה ללא תלות באור או כל גורם אחר. על סדרת תמונות אלו נעשה ממוצע ומתקבלת "תמונת החושך", D . סדרת התמונות הבאה שנלקחת הינה תמונות של התפלגות האור על האינדיקטור ללא הפעלת השדה המגנטי (סדרה זו נלקחת כאשר הזווית בין הקטבים אינה אפס, כך שאור יוכל לעבור בין המקטבים למרות שלא הפעלנו שדה מגנטי. זווית זו של המקטבים תישמר קבועה לאורך כל הניסוי). מיצוע על סדרה זו ינפק לנו את תמונת ה"שדה אפס", ZF , אשר בעזרתה נוכל להוריד רעשים במידת האפשר, וכן לנרמל את עוצמת האור על האינדיקטור (נרמול זה בא כנגד התפלגות האור הגאואסיאנית הלא הומוגנית המתקבלת מהלייזר). הסדרה השלישית והאחרונה לצרכי הכיוול תהיה סדרת תמונות הנלקחת בנוכחות סדרה של ערכי שדה מגנטי עולים בקצב קטן וקבוע, $H_z(i)$. סדרת התמונות השלישית נלקחת ללא דגם או באזור רחוק מהדגם כך שלא תושפע ממנו אלא ע"י השדה החיצוני בלבד, והיא מסומנת כ- $Calib(i)$.

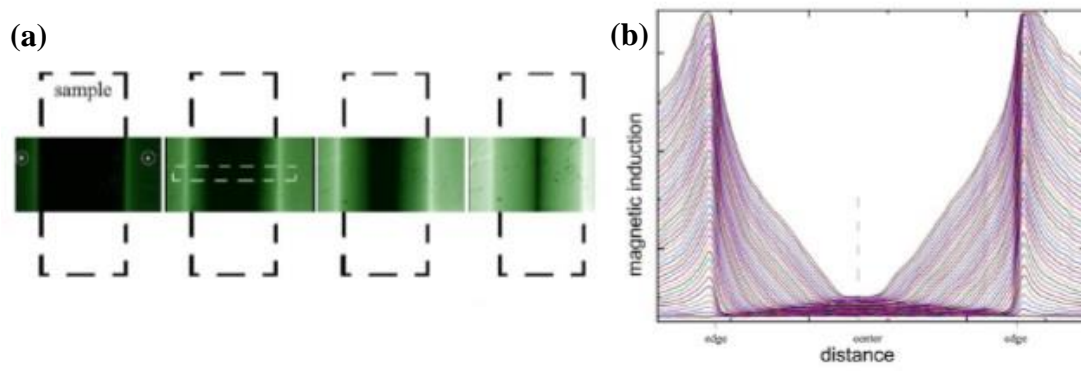
בעזרת שלושת הסדרות הללו נוכל לבנות טבלת כיוול $F(i)$ כנגד $H_z(i)$ לפי:
$$F(i) = \frac{Calib(i) - ZF}{ZF - D}$$

(במצלמה שלנו יש אפשרות לכיוול "תמונת החושך", דהיינו איפוס עוצמת האור כשהצמצם סגור עוד במהלך המדידה, כך שבפועל נוכל לוותר על חלק זה כיוון שכל ערכי מטריצת "תמונת החושך", D , יהיו אפסים). בעזרת הטבלה ניתן לבנות גרף אשר תעשה עליו אינטרפולציה, ובדרך זו תתקבל פונקציית כיוול הממירה ערכים של עוצמת אור לגדלי שדה מגנטי (איור 2.6 מציג גרף לדוגמא אשר ממנו ניתן לקבל את הפונקציה המקשרת בין רמת אפור, המקבילה לעוצמת אור, לבין השדה המגנטי בגאוסים).



איור 2.6: גרף המתאר את הקשר בין רמת אפור לבין שדה מגנטי בגאוסים. ניתן לבצע אינטרפולציה על הגרף ולקבל פונקציה כיוול באמצעותה אפשר להמיר פיקסלים עם ערכי רמות אפור לערכים של שדה מגנטי.

באופן מעשי במהלך הניסוי מתקבלות תמונות של עוצמות אור, וע"י פונקציית הכיול ניתן להמיר את התמונות הללו למטריצות בעלות מרחב זו מימדי, $B_z(x,y)$, של ערכי שדה מגנטי המתארות את האינדוקציה המגנטית בדגם. התפלגות האינדוקציה המגנטית המתקבלת בעזרת הדמיה המגנטו-אופטית יכולה לשמש לקבלת פרופיל השדה המגנטי בדגם, המגנטיזציה, הזרם הקריטי וכו'. באופן בסיסי, בעזרת טכניקת ההדמיה המגנטו-אופטית, ניתן גם ללמוד על התכונות היסודיות של חומרים על מוליכים כמו למשל הטמפרטורה הקריטית למעבר הפאזה, אשר מתחתייה נוכל לראות את התכונות הדיאמגנטיות של העל מוליך הממסך את קווי השטף מתוכו, ללמוד אודות פאזות מערך הפלאקסונים בדגמים הנמדדים, ומגוון תופעות מגנטיות נוספות. דוגמא להדמיה מגנטו-אופטית טיפוסית ופרופיל האינדוקציה הנוצר לרוחב הדגם מוצגים באיור 2.7 המתאר את חדירת השטף המגנטי למוליך-על שנחשף לשדה מגנטי עולה. האיור מתאר את המצב השכיח שבו השטף חודר בחזית ישרה ואחידה.

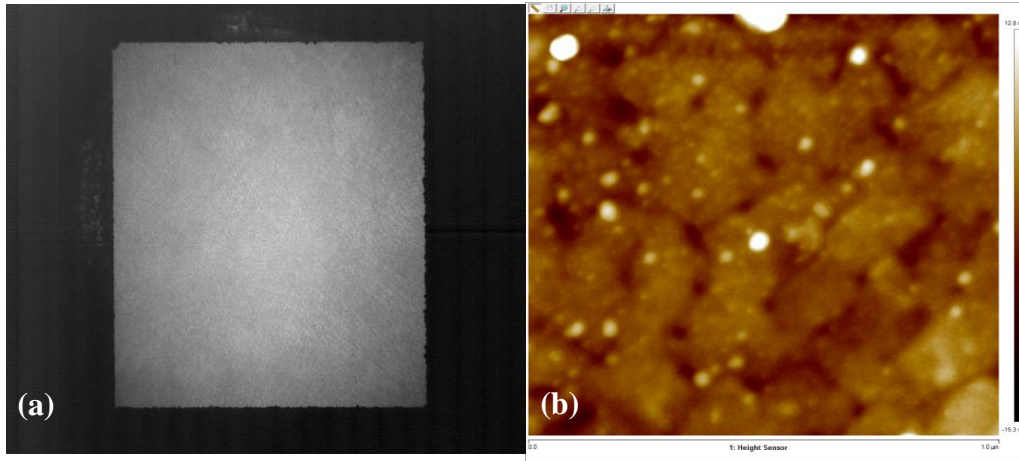


איור 2.7: הדמיה מגנטו-אופטית של דגם מוליך על בנוכחות שדה מגנטי חיצוני עולה. (a) ההדמיה של התפלגות האינדוקציה בדגם המתקבלת בעליית השדה מ 0 Oe ל 200 Oe (משמאל לימין), כאשר עוצמת אור בהירה יותר שקולה לאינדוקציה גבוהה יותר. (b) התפתחות האינדוקציה בתוך האזור המקווקו כפונקציה של המיקום בדגם תוך עליית השדה החיצוני. לקוח ממקור [46].

בעבודה זו נתמקד בחקירת התופעה של חדירת שטף מגנטי בתצורות לא יציבות אל תוך דגמים על-מוליכים. תופעות של חדירת שטף מגנטי למוליכי-על, ובפרט תופעות של תצורות אי יציבות, הינן תופעות דינמיות, לוקאליות ומהירות, ועל מנת לאתרן ולחקור אותן יש צורך במערכת שמסוגלת למדוד לוקאלית ובמהירות את האינדוקציה המגנטית בכל נקודה בדגם. מדידות מגנטיות "גלובליות" המתבצעות באמצעות מערכות כגון SQUID או VSM לא יענו על הצרכים; מערכות כאלה נותנות אינפורמציה על המגנטיזציה הממוצעת של הדגם. המערכת המגנטו-אופטית המהירה מאפשרת לנו לבדוק באילו תנאים יתקיימו תופעות אלו ומה ההשלכות שלהן. על כן, עיקר השימוש במערכת במחקר זה היה לאיתור המצבים הלא יציבים והתנאים להוצרותם, כמו גם נסיון להבין איך ניתן להימנע מתצורות החדירה הלא יציבות של השטף המגנטי. בכדי לחקור לאפיין את תצורות החדירה הבלתי יציבות השתמשנו בפילמים דקים של YBCO עליהם ארחיב בסעיף הבא.

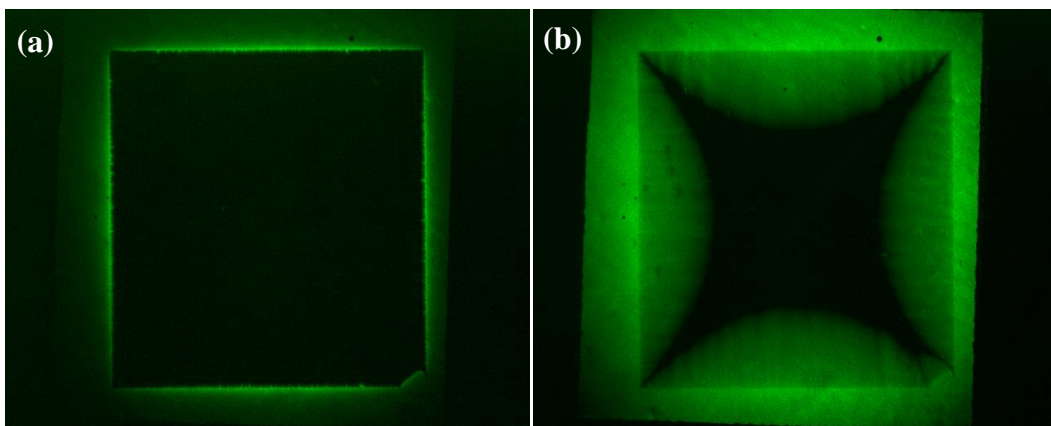
2.4 דגמי ה - YBCO

הדגמים ששימשו לצורך המחקר הינם פילמים של YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$), שהוא מוליך על בטמפרטורות גבוהות (HTS). פילמים בעובי של 150 nm גודלו בשיטת ה-thermal reactive co-evaporation [51] על ארבעה סוגים שונים של מצעים: yttrium, Al_2O_3 (Sapphire), stabilized zirconia (YSZ), MgO (Magnesia), ו- SrTiO_3 (STO). בכדי להימנע מגידולים אי-הומוגניים או תופעות של דיפוזיה וריאקציה בין ה- YBCO למצעים השונים, גודלה בכולם (פרט למagnesia) שכבה מקשרת של CeO_2 (Ceria) בעובי של 10 nm. הדגמים היו בעלי טמפרטורה קריטית של 87 K, וזרם קריטי, j_c , של 3.8 MA/cm^2 בטמפרטורה של 77 K. גודלם של הדגמים הינו $4 \times 4 \text{ mm}^2$ המותאם למדידות במערכת הניסיונית, ושכבת ה- YBCO עליהם הינה גרגרית ובאוריינטציית ציר-c אפיטקסיאלי ניצב למצע הגידול. בחלק מן הדגמים יצרנו פגמים ע"י חיתוכים שנעשו מקצה הדגם באמצעות מסור חוט. חיתוכים אלו היו בעלי רוחב של כ- $80 \mu\text{m}$ לערך ובעלי אורך משתנה בין 0.5-3 mm. כפי שנסביר בהמשך, תפקידם של הפגמים הוא להגביר לוקאלית את האינדוקציה המגנטית המושרית ע"י השדה החיצוני [52-54]. על מנת לוודא את איכות הדגמים הם נבחנו אופטית ומגנטו-אופטית וכן ע"י atomic force microscope (AFM), הן לפני והן לאחר ביצוע החיתוכים. איור 2.8 מדגים את איכות הדגמים: באיור 2.8(a) מוצגת תמונה אופטית של אחד מן הדגמים (במקרה זה זהו דגם YBCO המגודל על מצע ספיר) בה ניתן לראות איכותית את שכבת ה- YBCO ההומוגנית ללא פגמים בסקלה מיקרומטרית למעט פגמים מיקרומטרים בקצות הדגם (גודל הדגם בתמונה הוא $4 \times 4 \text{ mm}^2$). איור 2.8(b) מציג סריקת AFM של שכבת ה- YBCO, האזור הנסרק הוא בגודל של $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ וסקלת הצבעים מציגה שינויים בגובה של כ- 28 nm בגובה הדגם. ניתן לראות את האופי הגרגירי של השכבה בעלת גרגירים בקוטר של כ- $40 \mu\text{m}$.



איור 2.8: תמונה אופטית ותמונת AFM של דגם YBCO המגודל על מצע של ספיר. (a) 2.8 הינה תמונה אופטית של הדגם שגודלו 4x4 mm, ואילו (b) 2.8 היא תמונת AFM בשטח של $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ של שכבת ה-YBCO, והתפלגות הצבעים בה מציגה את השינויים בגובה ביחס לפני השטח (בין 15.3 nm - לכהה ביותר לבין 12.8 nm לבהיר ביותר). ניתן לראות את החומר הגרגירי, בעל גרגירים בקוטר של כ- $40 \mu\text{m}$.

להלן נציג דוגמא לתמונות מגנטו-אופטיות הממחישות גם הן את טיב הדגמים.



איור 2.9: תמונות מגנטו-אופטית של דגם YBCO המגודל על מצע YSZ. תמונות (a) ו-(b) נלקחו בטמפרטורה של 7 K ובשדות של 10 mT ו- 60 mT בהתאמה. ניתן לראות כי בשדה הנמוך הדגם ממסך את השדה במלאו וגבולות הדגם ברורים וחדים וללא פגמים. באותו האופן גם בשדה הגבוה ניתן לראות כי הדגם הומוגני ומאפשר חדירה הומוגנית של השטף ואין בדגם איזורים פגומים המאפשרים חדירת שטף נוספת.

איור 2.9 מציג תמונות מגנטו-אופטיות הממחישות את איכות הדגם. התמונות הינן של פילם דק של YBCO בעובי של 150 nm שגודל על מצע של YSZ, והן נלקחו בטמפרטורה של 7 K תחת חשיפה לשדות של 10 mT ו- 60 mT עבור (a) ו-(b) בהתאמה. ניתן להיווכח כי תחת השדה

של 10 mT הדגם ממסך את השדה במלאו וגבולות הדגם נראים חדים וברורים ללא פגמים. בנוסף גם בשדה של 60 mT הדגם מאפשר חדירה הומוגנית לחלוטין המעידה על כך שאין בשפת הדגם פגמים 'משמעותיים' העלולים לגרום להגברה לוקלית של השטף.

בנוסף לכל הדגמים הנ"ל מדדנו גם דגם YBCO שגודל בטכניקת laser ablation [55], והוא בעל טמפרטורת מעבר פאזה של 89 K וזרם קריטי של 2 MA/cm^2 בטמפרטורה של 77 K. דגם זה כולל חריצים מלבניים בעלי רוחב של $17 \mu\text{m}$ שנעשו באמצעות ליתוגרפיה, חריצים אלו שימשו לצרכי מחקר אחר שנעשה בעבר באמצעות שימוש בדגם הנ"ל.

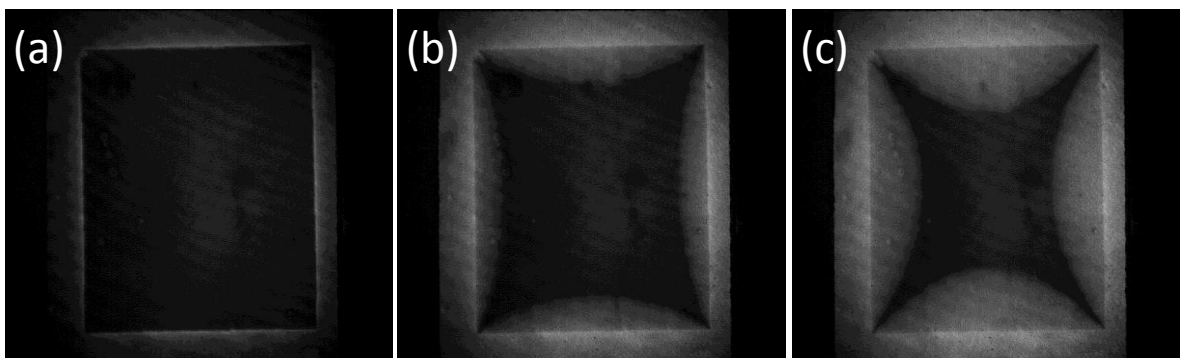
פרק 3 – תוצאות ודיון

פרק זה יתאר את תוצאות ההדמיה המגנטו-אופטית של חדירת שטף מגנטי אל דגמי YBCO מוליכי על. התוצאות כוללות תצורות חדירה יציבות מחד, ותצורות חדירת שטף בלתי יציבות מאידך. נוסף על כך, בפרק יוצגו דיונים בתוצאות והשלכותיהן של התוצאות. תוצאות אלו מהוות את חלק הארי של עבודת מחקר זו.

3.1 תצורות חדירת שטף מגנטי יציבות במוליכי על

מחקר זה בחן את תהליך החדירה של השטף המגנטי במוליך-על מסוג $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ באמצעות הדמיה מגנטו-אופטית המאפשרת לראות את התפלגות האינדוקציה המגנטית בדגם. ההדמיות המגנטו-אופטיות בוצעו בנוכחותם של שדות מגנטיים חיצוניים משתנים, H , המאונכים לפני הדגם (בכיוון ציר z), כאשר קצב עליית השדה, dH/dt , היה בין גאוסים לשנייה לבין קילו-טסלות לשנייה. תחום הטמפרטורות הנבדק במדידות השונות היה בטווח של $7\text{ K} - 60\text{ K}$.

נציג תחילה את תוצאות ההדמיה לשכבות דקות של YBCO בעובי של 150 nm שגודלו על ארבעת סוגי המצעים - STO , Magnesia , Sapphire , ו- YSZ - בניסויים בהם קצב עליית השדה הוא איטי יחסית (בין עשרות לאלפי גאוסים לשנייה). כל הניסויים בכל הדגמים הציגו תצורת חדירה יציבה של שטף מגנטי הנראית כחזית שטף אחידה החודרת מקצות הדגם. איור 3.1 מציג דוגמא לתצורות אלו אשר התקבלו במדידות שנעשו על דגם YBCO בעל מצע STO .



איור 3.1: תצורות חדירה של שטף מגנטי בתצורת חזית גל אחידה שהתקבלו בהדמיה מגנטו-אופטית עבור פילם של $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ בעובי 150 nm על שגודל על מצע של STO . התמונות (a)-(c) נלקחו בטמפרטורה של 7 K , ובשדות של 10 mT , 40 mT ו- 60 mT בהתאמה.

התוצאות הנראות באיור 3.1 התקבלו עבור פילם YBCO בעובי של 150 nm שגודל על מצע של STO. טמפרטורת הדגם בתמונות אלו הייתה 7 K. ב- 3.1(a) השדה החיצוני היה 10 mT, והוא הציג מיסוך מלא של השדה, כלומר הדגם לא אפשר לקווי שטף לחדור לתוכו, וניתן לראות בבירור את קצות הדגם בהן הבהירות היא הגבוהה ביותר הודות לזרמי המיסוך הנמצאים על שפות הדגם המגבירים את השדה שמחוצה לו. באיורים 3.1(b) ו- 3.1(c) השדות היו 40 mT ו- 60 mT בהתאמה, והם מציגים את אופי חדירת השטף היציבה. השטף חודר אל פנים הדגם בתצורה של חזית גל אחידה כאשר עומק חדירת השטף אל הדגם פרופורציונאלי לשדה המופעל עליו. דגמי ה- YBCO אשר גודלו על שלושת המצעים האחרים הראו גם הם תוצאות דומות, כאשר חדירת השטף המגנטי הייתה בעלת אופי זהה לתוצאות שהתקבלו עבור הדגמים בעלי מצע ה- STO (דוגמא לכך ניתן לראות באיור 2.5 המציג את החדירה היציבה בדגם בעל מצע של Sapphire). תצורות החדירה היציבות נצפו בכל הדגמים ללא תלות בטמפרטורה, פרט לעובדה שבטמפרטורה גבוהה יותר עומק חדירת השטף אל תוך הדגם היה גדול יותר. גם בעניין התלות בשדה החיצוני ובקצבי עליית השדה לא נצפו הבדלים באופי החדירה, וחזית הגל האחידה נשמרה בכל סוגי הדגמים פרט לדגמי ה- YBCO שגודלו על מצע ה- YSZ. דגמים אלו - הדגמים שגודלו על מצע ה- YSZ - הציגו תצורות חדירת שטף אי יציבות בתנאים מסוימים של עליית שדה חיצוני בקצבים מהירים. תוצאות אלו ודיון בהן יוצגו בהמשך הפרק.

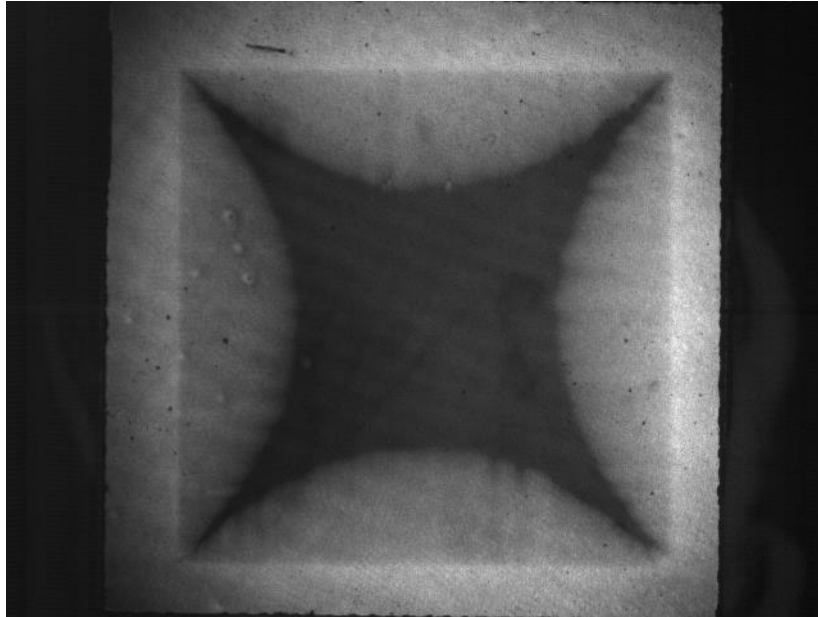
תופעה של חדירת שטף כחזית גל אחידה אל חומר מוליך על הינה תופעה מוכרת בה החומר מוליך העל הנמצא במצב ה"פאזה המעורבת" מאפשר חדירה של שטף מגנטי לתוכו מעל השדה הקריטי הראשון H_{C1} . תצורות הקלאסיות של חדירת השטף היציבה תואמות למודל הקריטי של Bean המתאר חדירה סימטרית. עומק החדירה נקבע ע"י הזרם הקריטי בדגם, j_c , והגיאומטריה של הדגם. תוצאות דומות נראו בעבר במגוון חומרים מוליכי-על ואף בדגמי YBCO הדומים לאלו ששימשו למחקר [56].

3.2 חדירת שטף בלתי יציבה בשכבות דקות של YBCO

בסעיף זה נתאר מדידות בדגמי ה- YBCO שגודלו על ארבעת המצעים השונים: Sapphire, Magnesia, STO, ו- YSZ הנחשפים לשדה העולה במהירות לערכו המקסימלי. הזכרנו כבר, בסעיף 3.1, הדגמים שגודלו על מצע ה- YSZ הציגו אי-יציבות ותצורות דנדריטיות לאחר שנחשפו לשדה מגנטי העולה בקצב הגבוה מקצב-סף (התלוי בטמפרטורה). הדגמים האחרים הציגו תצורות דנדריטיות רק לאחר הוספה של פגם מלאכותי. נתחיל את תיאור התוצאות בדגם ה- YSZ.

I. חדירות השטף הדנדריטיות עבור דגמי ה-YBCO המגודלים על מצע ה-YSZ

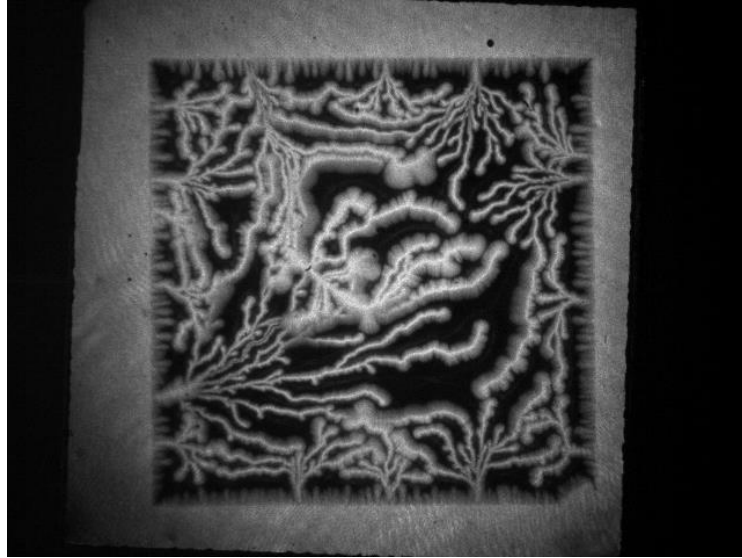
איכות הדגמים שגודלו על מצע YSZ נבדקה ע"י העלאת שדה בקצבים סטנדרטיים (2-20G/s). מדידות אלו הציגו חדירות שטף מגנטי יציב בעל חזית גל אחידה כמודגם באיור 3.2. נזכיר שוב, שתוצאות דומות התקבלו גם לדגמים שגודלו על שלושת המצעים האחרים.



איור 3.2: תמונה מגנטו-אופטית של שכבת YBCO בעובי של 150 nm המגודלת על מצע YSZ. התמונה ממחישה את יציבות הדגם המתבטאת בהתפלגות ההומוגנית של האינדוקציה בדגם. תמונה זו נלקחה בטמפרטורה של 7 K, ולאחר חשיפה לשדה מגנטי של 60 mT שהועלה בקצב סטנדרטי של 2 mT/s. הקירור בוצע ללא נוכחות של שדה חיצוני. הנקודות הנראות בצדו השמאלי של הדגם הינם תוצאה של פגמים באינדיקטור עצמו.

ההדמיה המגנטו-אופטית של הדגם המוצג באיור 3.2 מראה את התפלגות האינדוקציה המגנטית ההומוגנית בדגם. הדגם קורר אל טמפרטורה של 7 K ללא הפעלת שדה, ולאחר מכן נחשף לשדה מגנטי של 60 mT. קל להבחין בגבולות הדגם הריבועי מהן מתחילה החדירה ההומוגנית, ומסביבם ישנה הגברה של השדה החיצוני בעקבות זרמי המיסוך. הנקודות הנראות קרוב לשפתו השמאלית של הדגם הינם פגמים על האינדיקטור ולא על הדגם.

תוצאות שונות לחלוטין התקבלו בדגמים שגודלו על מצע ה-YSZ לאחר חשיפה לשדה שעלה מאפס בקצב מהיר מאד. בעת חשיפה כזו, הדגמים הציגו אי-יציבות והציגו פריצות רבות של שטף בתצורה דנדריטית הדגם. באיור 3.3 ניתן לראות את תוצאות ההדמיה המגנטו-אופטית המציגות את פריצות השטף הדנדריטיות אל תוך הדגם שגודל על מצע YSZ. בתמונה זו הדגם נמצא בטמפרטורה של 7 K לאחר חשיפה לשדה שעלה מאפס ל-60 mT בקצב של 3 kT/s.



איור 3.3: חדירת השטף בתצורה הדנדריטית אל תוך אחד מדגמי ה-YBCO המגודלים על מצע YSZ. בתמונה זו הדגם נמצא בטמפרטורה של 7 K לאחר חשיפה לשדה שעלה מאפס ל-60 mT בקצב של 3 kT/s. הדגם מציג התפלגות אינדוקציה אי-הומוגנית לחלוטין עם מקורות פריצה רבים והסתעפויות רבות של השטף בתוכו. הענפים הבהירים יותר שמקורם בפריצה שבשפה העליונה הינם תוצאה של דנדריט שפרץ מעט מאוחר יותר (כלומר, בשדה מעט גבוה יותר) ביחס לשאר הדנדריטים ועל כן האינדוקציה בענפים אלו גבוהה יותר.

איורים 3.2 ו-3.3 מציגים את האינדוקציה המגנטית באותו הדגם, באותה הטמפרטורה לאחר קרור בשדה אפס. ההבדל הנסיוני היחיד הוא קצב העלאת השדה מאפס ל-60 mT. העלאה בקצב מהיר של 3 kT/s הביאה למפולות שטף אל תוך הדגם. תוצאות זהות התקבלו בכל הדגמים המגודלים על מצע ה-YSZ. נזכיר שוב שדגמים אלה, כמו גם הדגמים שגודלו על מצעים אחרים, הם דגמים הומוגניים, ללא פגמים מעל הסקלה המיקרומטרית, ודוגמא הממחישה זאת ניתן להסיק ממדידות אופטיות (איור 2.8), AFM (איור 2.8), ומדידות מגנטו-אופטיות (איור 3.2) (תמונות זהות נראו בכלל הדגמים).

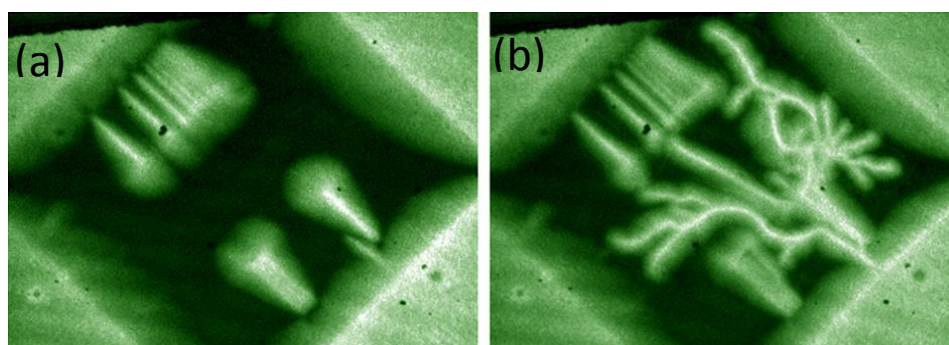
כפי שצויין כבר קודם לכן, דגמי ה-YBCO שגודלו על שלושת המצעים האחרים לא הציגו חדירה של שטף בתצורה דנדריטית, אף לא בעת חשיפתם לשדה שעלה בקצב מהיר. בכדי להגיע לאי יציבות בדגמים אלו היה צורך ביצירה של פגמים מלאכותיים בדגם, הבנת צורך זה נולדה כתוצאה ממדידות שעשינו בדגם YBCO ישן יותר. נציג כעת את המדידות שבוצעו בדגם זה.

תצורות שטף דנדריטיות בדגם YBCO מהורץ

באחת המדידות נבדק פילם של YBCO בעובי 250 nm שגודל על STO בטכניקת laser ablation [55], והוא בעל טמפרטורת מעבר פאזה של 89 K וזרם קריטי של 2 MA/cm^2

בטמפרטורה של 77 K. דגם זה שימש במקור למחקר אחר אשר בחן את זרמי מייסר בדגם מחורץ [47] לפני כעשרים שנה, והוא כולל חריצים מלבניים ברוחב $17 \mu\text{m}$ שנעשו באמצעות ליתוגרפיה.

באיור 3.4 מוצגות תוצאות שהתקבלו ממדידת התפלגות האינדוקציה המגנטית בדגם לאחר חשיפה לשדה חיצוני, המדידה נעשתה באמצעות המערכת המגנטו-אופטית. הדגם קורר ללא שדה לטמפרטורה של 7 K ואז הופעל שדה חיצוני אשר עלה מ-0 ל-60 mT בקצב של 2.4 kT/s. לאחר חשיפה זו הדגם הציג התנהגות נורמלית כאשר חדירת השטף נצפתה משפות הדגם וכן מהאזורים המלבניים שאינם על מוליכים, החדירה הנ"ל מוצגת באיור 3.2(a) (עוצמת האור בתמונה פרופורציונאלית לעוצמת השדה כך שבאזור החשוך בדגם אין חדירת שדה ואילו באזורים הבהירים ישנו שדה שגודלו גדול יותר ככל שהאזור בהיר יותר). לאחר מכן בוצעה חשיפה נוספת של הדגם לשדה חיצוני (לאחר שהדגם חומם מעל הטמפרטורה הקריטית שלו וקורר מחדש ל-7 K ללא נוכחות של שדה) אך הפעם הדגם נחשף לשדה שעלה מ-0 mT ל-60 mT בקצב מהיר יותר, של 3 kT/s. הפעם התוצאה שהתקבלה הייתה שונה בתכלית כאשר נצפתה פריצה של שטף מגנטי אל תוך הדגם מתוך אחד החריצים. באיור 3.4(b) ניתן לראות כי התרחשה פריצה של שטף בתצורה דנדריטית מצדו הימני התחתון של הדגם. במדידות הבאות נבדקו התנאים עבורם הדגם יציג את הפריצות הללו, התוצאות הראו כי בשדה של 60 mT תוך שמירה על קצב עליית השדה של 3 kT/s התקבלו מפולות השטף אל תוך הדגם עד בין הטמפרטורות 7 K ועד 20 K. מעל טמפרטורה של 20 K הדגם חזר להציג את תצורות החדירה הקלאסיות בדומה לתוצאה שהתקבלה באיור 3.4(a). טמפרטורה זו, 20 K, היא טמפרטורת הסף העליון להוצרות תצורות השטף האי יציבות בדגם זה. מבחינת קצב עליית השדה להתרחשות התופעה, הדגם הציג את הפריצות הדנדריטיות אך ורק כאשר קצב עליית השדה היה המהיר ביותר במסגרת המגבלות של המערכת (3 kT/s), בקצבים איטיים יותר לא נצפו פריצות של שטף אל תוך הדגם. קצב זה של עליית השדה מגדיר את הסף התחתון להיווצרות של תצורות לא יציבות.

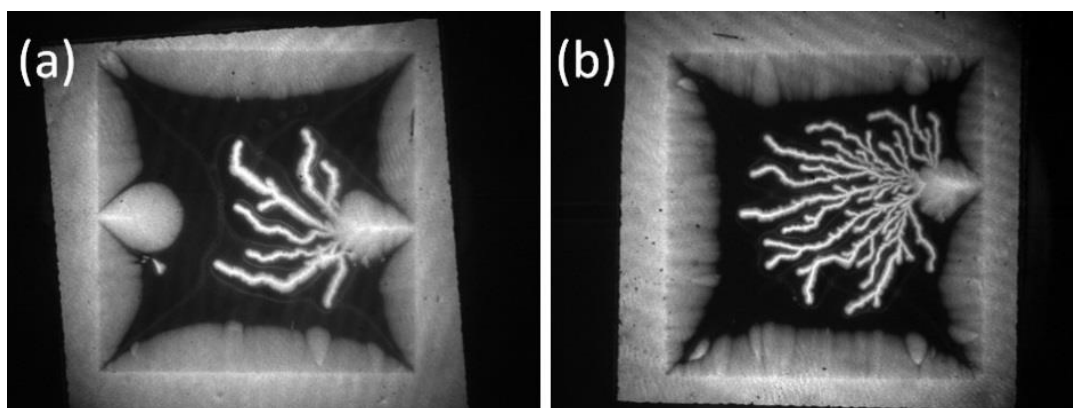


איור 3.4: השוואת חדירה של שטף מגנטי אל דגם מוליך על מסוג YBCO. עובי הדגם היינו 250 nm והתמונות נלקחו בטמפרטורה של 7 K ובשדה של 60 mT, לאחר עליית השדה מאפס ל-60 mT בקצבים של (a) 2.4 kT/s ו-(b) 3 kT/s. התמונה השנייה מציגה את חדירת השטף בתצורה הדנדריטית אל תוך הדגם.

אחד מן ההבדלים המהותיים שהיו בין הדגם הנייל לבין הדגמים המתוארים בסעיף 3.1 היו הפגמים המלבניים שהיו קיימים בדגם. תוצאה זו הניעה אותנו להוסיף פגמים מלאכותיים לדגמי ה-YBCO החדשים יותר שלא הציגו תצורות חדירה דנדריטיות, כלומר לדגמים שגודלו על מצעי ה-Sapphire, ה-STO, וה-Magnesia. בעזרת מסור-חוט ואבקת יהלום יוצרו בחלק מן הדגמים פגמים ברוחב של כ- $80 \mu\text{m}$ באורך שבין 0.5 ל- 1 מ"מ בניצב לשפת הדגם. הדגמים הוכנסו מחדש למדידות ובשונה מן המדידות הקודמות שנעשו לפני הוספת הפגמים, הפעם התקבלו תוצאות אשר הציגו חדירות שטף בלתי יציבות בתצורה דנדריטית כמתואר להלן.

II. חדירות שטף בלתי יציבות בדגמי ה-YBCO על מצעי ה-Sapphire וה-STO

איור 3.5 מציג את תצורות החדירה הדנדריטיות - דרך הפגם שבשפתו הימנית של הדגם - שהתקבלו עבור דגמי ה-YBCO על מצעי ה-Sapphire וה-STO.



איור 3.5: תוצאות ההדמיה המגנטו-אופטית שהתקבלו עבור דגמי ה-YBCO המגודלים על מצע (a) STO ו-(b) Sapphire. התמונות נלקחו בטמפרטורה של 7 K, ולאחר חשיפה לשדה מגנטי שהועלה בקצב מהיר של 3 kT/s מאפס ל- 60 mT . ניתן להבחין בפריצות השטף הדנדריטיות שמקורן בפגמים המלאכותיים בשפתן הימנית של הדגמים.

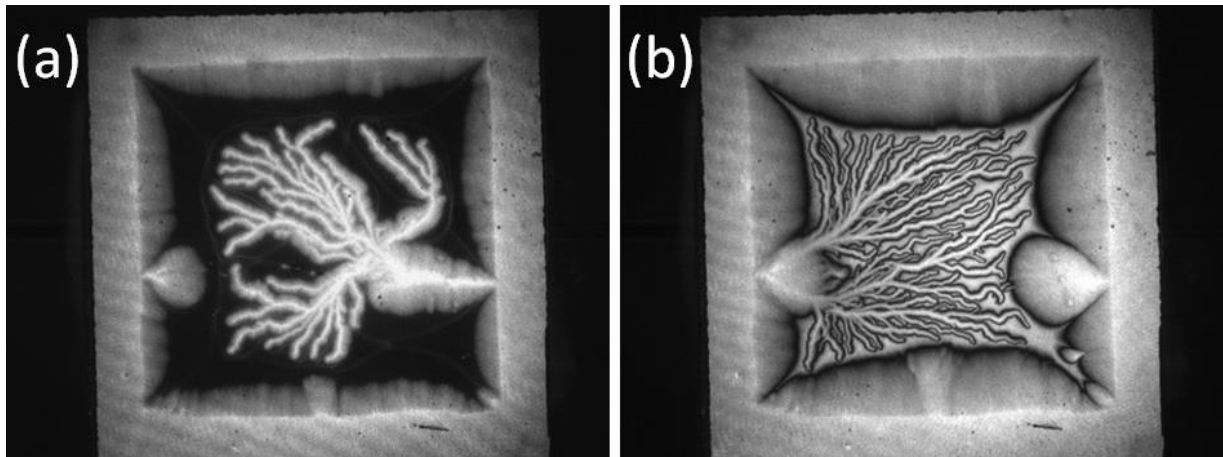
בהדמיות המגנטו-אופטיות המוצגות באיור 3.5 הדגמים קוררו ללא שדה לטמפרטורה של 7 K ולאחר מכן נחשפו לשדה שעולה מאפס ל- 60 mT בקצב מהיר של 3 kT/s . התפלגות האינדוקציה המגנטית בדגמים, התואמת לעוצמת האור בכל נקודה בדגם, חושפת את אי היציבות התרמו-מגנטית של מוליכי העל תחת תנאי המדידה המתוארים. אי-יציבות זו מתבטאת במפולת של שטף מגנטי אל תוך אזורים בדגם שקודם לכן היו ממוסכים לכניסת השדה. ניתן להבחין גם כי מקורות פריצות השטף בתצורה הדנדריטית בדגמים אלו הם החתכים שיוצרו באמצעות מסור החוט בשפות הדגמים. בשני הדגמים מקור הפריצה היה פגם בשפה הימנית של הדגם כאשר בדגם

שגודל על מצע ה-STO ישנו חתך נוסף בשפת הדגם השמאלית אך חתך זה לא הציג פריצות של שטף במהלך המדידות.

III. תצורות חדירה בלתי יציבות בדגמי YBCO המגודלים על מצע ה-MgO

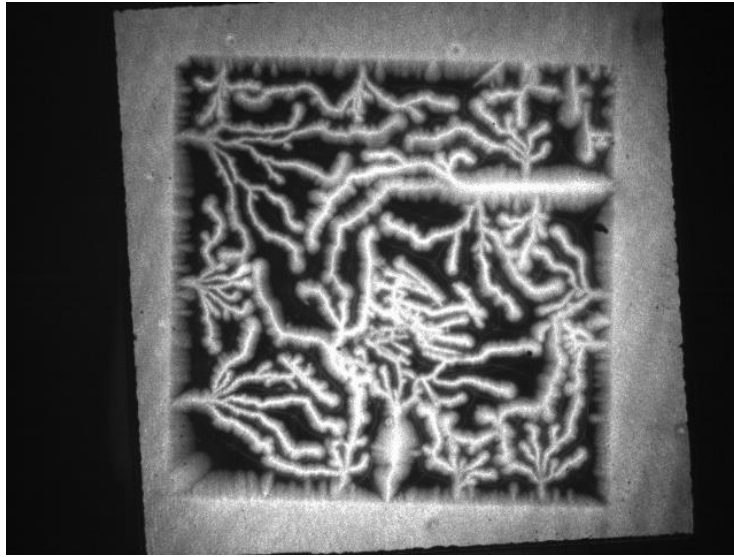
דגמי ה-YBCO שגודלו על מצע ה-Magnesia הראו התנהגות שונה במקצת מזו שהוצגה בסעיף הקודם. בדומה לדגמים הקודמים, גם דגמים אלו הציגו פריצות שטף בתצורה דנדריטית רק לאחר הוספת פגמים באופן מלאכותי ותוך חשיפה לשדות אשר קצב העלייה שלהם היה מהיר. ההבדל המהותי בין הדגמים שגודלו על מצע ה-Magnesia לאלו המגודלים על מצעי ה-Sapphire וה-STO היה הקושי בהשגת הפריצות הבלתי יציבות. בדגמים אלה (עם מצע Magnesia) הפריצות הדנדריטיות נצפו רק לעיתים ולא בכל העלאת שדה מהירה.

בדגמים על מצע ה-Magnesia הושגו פריצות באופן זהה לתהליך שתואר בסעיף הקודם הכולל את קירור הדגם בלא שדה אל טמפרטורה של 7 K, ואח"כ חשיפה לשדה שעלה מאפס ל-60 mT בקצב של 3 kT/s פעמים ספורות בלבד. ברוב הפעמים כאשר חזרנו על המדידה בתנאים זהים לא נצפו פריצות שטף דנדריטיות, זאת בניגוד לדגמים הקודמים בהן הבאת הדגמים לאי-יציבות ויצירת מפולות השטף, חזרה על עצמה כמעט בכל המדידות שנעשו בתנאים הללו. בכדי להתמודד עם הקושי בייצור חדירות של שטף בתצורות דנדריטיות אל דגמי ה-Magnesia הוכנס שינוי בתהליך המדידה בכך שהדגם קורר ל-7 K בנוכחות שדה חיצוני של -60 mT. לאחר הקירור הנ"ל והתייצבות על הטמפרטורה כיבינו את השדה החיצוני ורק לאחר מכן חשפנו את הדגם לשדה חיצוני זהה לזה היה במדידות הקודמות, כלומר עליית שדה מאפס ל-60 mT בקצב של 3 kT/s. בעזרת השינוי בתהליך המדידה הושגו פריצות של שטף אל דגמי ה-Magnesia בקלות רבה יותר והצלחנו לשחזר את הפריצות הללו פעמים רבות. איור 3.6 מצג את התוצאות שהתקבלו עבור דגמי ה-YBCO על מצע ה-Magnesia כש-3.6(a) מצג את אחת מן הפריצות הדנדריטיות הבודדות שנצפו בדגמים אלו כאשר תהליך הקירור בוצע ללא נוכחות שדה חיצוני, ו-3.6(b) הינה הדמיה המציגה פריצת שטף בדגם שהקירור שלו כן כלל נוכחות שדה מגנטי חיצוני. כפי שניתן לראות גם בדגם זה מקור הפריצות הינם הפגמים המלאכותיים שייצרו בדגם.



איור 3.6: הדמיות מגנטו-אופטיות בדגמי YBCO המגודלים על מצע מסוג MgO. בצדי הדגם ישנם פגמים אשר יוצרו במתכוון ע"י חיתוך במסור חוט. (a) התמונה מראה את חדירת השטף בתצורה הדנדריטית בדגם שקורר ללא שדה ואח"כ נחשף לשדה חיצוני של 60 mT כאשר קצב עליית השדה מאפס ל-60 mT היה 3 kT/s. (b) הדמיה המציגה את חדירת השטף הבלתי יציבה בדגם שקורר בנוכחות שדה חיצוני של -60 mT, ורק אח"כ נחשף לשדה הזהה לזה שהופעל בתמונה הראשונה. שתי התמונות נלקחו בטמפרטורה של 7 K.

לשם בדיקה והשוואה לתוצאות שהתקבלו בשלושת המצעים האחרים נעשה גם באחד מדגמי ה-YSZ חתך באמצעות מסור החוט ולאחר מכן הדגם נמדד מגנטו-אופטית בכדי לבדוק את השפעות הפגם המלאכותי על התפלגות האינדוקציה בדגם. כפי שניתן לראות באיור 3.7 אופי חדירת השטף בתצורות הדנדריטיות נשמר וגם הפעם התקבלו פריצות ממקורות רבים לרבות פריצה מהחתך עצמו כפי שהתקבל בדגמים בעלי מצעי ה-STO, ה-Sapphire וה-Magnesia.



איור 3.7: פריצות השטף הדנדריטיות אל אחד מדגמי ה-YBCO המגודלים על מצע YSZ אשר נעשה בו חיתוך באמצעות מסור החוט. הדגם קורר לטמפרטורה של 7 K ונחשף לשדה שעלה מאפס ל-60 mT בקצב של 3 kT/s. ניתן להבחין במקורות הפריצה הרבים של השטף אל תוך הדגם כולל פריצה מתוך החתך בצדו השמאלי העליון של הדגם.

בדומה למדידה המוצגת באיור שלפניו (3.6) גם במדידה זו (איור 3.7) הדגם קורר לטמפרטורה של 7 K בלא שדה חיצוני ואח"כ נחשף לשדה חיצוני שעלה מאפס ל-60 mT בקצב מהיר של 3 kT/s. הדגם שוב הציג פריצות רבות של שטף בתצורת דנדריטים כולל פריצה מהפגם המלאכותי (החתך) הנראה בצדו השמאלי העליון של הדגם. כמו כן, ניתן גם להבחין כי הדנדריט הפורץ ממרכז השפה התחתונה של הדגם, נראה כפורץ מתוך פגם מלאכותי אף הוא. אך פגם זה אינו פגם שנעשה במתכוון אלא נוצר במהלך המדידות כתוצאה מפריצות השטף הדנדריטי. השלכה זו של הפריצות וחשיבותה תוצג ותפורט בהמשכה של עבודת מחקר זו.

3.3 תנאי הסף להתפתחות חדירת השטף הדנדריטית

תצורות חדירת השטף הדנדריטי בדגמי ה-YBCO נצפו רק תחת תנאי טמפרטורה מסוימים כאשר טמפרטורת הסף לפריצות השטף הייתה שונה עבור כל אחד מן הדגמים אשר גודלו על מצעים שונים. הדגמים שגודלו על מצע ה-YSZ הציגו דנדריטים כל עוד טמפרטורת הדגם הייתה מתחת ל-60 K, כלומר דגמים אלו הציגו פריצות שטף דנדריטיות בטווח הטמפרטורות 7 K – 60 K (7 K הינה הטמפרטורה נמוכה ביותר האפשרית במסגרת מגבלות המערכת). עבור הדגמים שגודלו על מצע ה-STO טווח הטמפרטורות בהן נצפו חדירות שטף בלתי יציבות היה בין 7 K לבין 50 K, ולעומת זאת סף הטמפרטורה העליון בדגמים על מצעי ה-Sapphire וה-Magnesia היה נמוך יותר כאשר פריצות אלו נצפו רק מתחת לטמפרטורה של 40 K. כלל המדידות של טמפרטורות הסף הללו נעשו בחשיפות לשדה מגנטי חיצוני שעלה מאפס ל-60 mT בקצב המהיר ביותר האפשרי של 3 kT/s.

תנאי סף נוסף נוגע לטווח קצב עליית השדות המאפשר את התפתחות הדנדריטים. במדידות אלו כל הדגמים קוררו לטמפרטורה של 7 K בלא נוכחות של שדה חיצוני ולאחר מכן נחשפו לשדה חיצוני שעלה מאפס ל-60 mT בקצבים משתנים. גם במקרה זה היה שוני בתוצאות עבור הדגמים השונים. דגמי ה-YBCO על מצע ה-YSZ הראו פריצות שטף גם בעבור טווח רחב מאוד של קצבים כאשר תחום קצבי השדה שבו נצפו מפולות השטף הבלתי יציבות היה בין 120 T/s לבין 3 kT/s (אלו הם שני הקצוות לקצבי עליית שדות שמערך הסלילים המהיר מאפשר. ללא שימוש במערך הסלילים המהיר ניתן לשנות את השדה החיצוני בקצב שהוא מסדר גודל של גאוסים לשנייה). בניגוד לדגמים שגודלו על מצע ה-YSZ, הדגמים שגודלו על שלושת המצעים האחרים הציגו את פריצות השטף הדנדריטיות בתחום קצבים צר בהרבה. ה-STO וה-Sapphire הציגו דנדריטים בתחום קצבי עליית שדה שבין 1-3 kT/s בלבד ואילו ב-Magnesia היה אף קשה יותר להשיג פריצות דנדריטיות והן נראו רק בקצב עליית השדה המהיר ביותר של 3 kT/s.

טבלה 3.1 מסכמת את התוצאות שתוארו להלן וכוללת בנוסף גם ערכים של המוליכות התרמית של ארבעת המצעים השונים בטמפרטורה של 7 K. תוצאות וערכים אלו ישמשו אותנו לדיון הבא.

מצע הדגם	המוליכות התרמית, κ , של המצע ב 7 K	טמפרטורת הסף העליונה	קצב עליית השדה המינימאלי
YSZ	0.05 W/mK	60 K	<120 T/s
STO	4.5 W/mK	50 K	1-3 kT/s
Shapphire	400-800 W/mK	40 K	1-3 kT/s
MgO	300 W/mK	40 K	3 kT/s

טבלה 3.1: טבלה 3.1 את התוצאות שהתקבלו עבור דגמי ה-YBCO בעובי של 150 nm שגודלו על ארבעת המצעים השונים; YSZ, STO, Shapphire ו-MgO (נזכיר כאן כי דגמי ה-MgO יוצאי דופן בכך שאינם כוללים את שכבת ה-CeO₂ המקשרת בין המצע לבין שכבת ה-YBCO, למידע נוסף ראה פרק 2 סעיף 2.4). טמפרטורת הסף העליונה להופעת הדנדריטים נמדדה בכל אחד מהדגמים לאחר קרום ללא שדה אל הטמפרטורה הרצויה ואח"כ נחשפו לשדה שעלה מאפס ל-60 mT בקצב של 3 kT/s. קצב עליית השדה הקריטי מעליו כל דגם הציג את אי-היציבות נמדד לאחר שהדגמים קוררו ללא שדה אל 7 K. הטבלה מציגה גם את ערכי המוליכות התרמית עבור המצעים השונים בטמפרטורה של 7 K. (ערכי המוליכות התרמית נלקחו מתוך; [57] עבור מצע ה-YSZ, [58] עבור מצע ה-STO ו-[60,59] עבור מצעי ה-Shapphire וה-MgO).

מקורן של חדירות השטף הבלתי יציבות במוליכי-על בתופעת אי-יציבות תרמו-מגנטית. הצטברות לוקאלית של שטף מגנטי באזורים אי הומוגניים בדגם מביאה לכדי פריצת שטף תוך חימום לוקאלי בדגם. חימום זה מחליש את אנרגיית הלכידה של הפלקסונים ומשחרר אותם לנוע. עקב כך ישנה עליה מקומית של הטמפרטורה בדגם ששוב מביאה לכדי החלשות של אנרגיית הלכידה. אם החומר מוליך העל והמצע עליו הוא מגודל לא מצליחים לשחרר את החום, אזי ייווצר פידבק חיובי אשר בסופו תהה פריצה של שטף בתצורות דנדריטיות (המזכירות פריצות של ברקים [61] כפי שצינו בהקדמה). פריצות אלו נראו אמנם לא מעט במוליכי-על בטמפרטורות נמוכות (LTS) [1-10] אבל כפי שכבר הזכרנו, נסיונות רבים בעבר להשגת פריצות בלתי יציבות במוליכי-על בטמפרטורות גבוהות (HTS), כמו YBCO, נחלו כישלון. למעשה, פריצות כאלה ב-YBCO הושגו אך ורק באמצעות מניע מלאכותי, דהיינו חימום לוקאלי ע"י פולס לייזר, כפי שהוצג במחקרים של ליידרר ושות' [11-13]. קבוצה זו דיווחה על מקרה בודד שבו התרחשה פריצה דנדריטית של שטף באופן 'ספונטני', כלומר בעקבות העלאת שדה ולא כתוצאה של חימום [62]. בנוסף, החוקרים דיווחו גם על נזק בלתי הפיך שנגרם לפילם בו התרחשה הפריצה. אבל, למרות נסיונות רבים, אותם החוקרים, ואחרים, לא הצליחו לחזור על תוצאה זו. במבט לאחור, על בסיס התוצאות שלנו, ברור שחוסר ההצלחה של אותם חוקרים נבע מכך שלא העלו את השדה בקצב גבוה מספיק. מכל מקום, עד לנסיון שתואר בעבודה זו, האפשרות ליצירת פריצות דנדריטיות והגבולות הנסיוניים לשמירת היציבות התרמו-מגנטית של HTS בכלל ו-YBCO בפרט היו בחזקת נעלם.

תוצאות העבודה הנוכחית חושפות לראשונה הופעה של חדירות שטף בלתי יציבות ב-HTS בדרך קונבנציונאלית של העלאת שדה בלבד. בדגמי ה-YBCO שגודלו על מצע ה-YSZ נצפו לראשונה חדירות שטף בתצורה דנדריטית ללא שימוש בלייזר כפי שנעשה בעבודות של ליידרר ושות' [11-13]. התוצאות שלנו מצביעות על כך שאי-יציבות בתצורה של חדירת שטף דנדריטי במוליכי-על אינה נחלתם של מוליכי-על בטמפרטורות נמוכות בלבד אלא זוהי תופעה גלובאלית השייכת לכלל מוליכי העל. בעבודה זו נצפו פריצות אי-הומוגניות של שטף מגנטי גם אל תוך דגמי ה-YBCO שגודלו על שלושת המצעים האחרים, אך במקרים אלו היה צורך בפגמים מלאכותיים בכדי לגרום לביצוע הפריצה תוך הגברה לוקאלית של השדה באזור הפגום. גם מקרים אלו הינם פריצת דרך שכן גם באופן זה לא נצפו בעבר חדירות שטף דנדריטיות במוליכי-על בטמפרטורות גבוהות.

התוצאות שהתקבלו בכל ארבעת המצעים השונים הינן בעלות חשיבות לתכנון אפליקציות עתידיות העושות שימוש בחומרים מוליכי על. הפריצות הבלתי צפויות והנזק הבלתי הפיך שהן משאירות אחריהן הינם שיקולים קריטיים בתכנונים אלו. על עניין זה נרחיב בהמשך העבודה.

אין ספק כי יציבותם התרמו-מגנטית של הדגמים הינה בעלת חשיבות עליונה בכל הנוגע להתפתחות התופעה והשלכותיה. התאוריות המתבססות על משוואות מקסוול לשדות החשמלי והמגנטי (משוואה (1)) ומשוואת הדיפוזיה התרמית (משוואה (2)) מצביעות על היחס שבין קבוע הדיפוזיה התרמית $D_h = \kappa / \rho C_p$ לבין קבוע הדיפוזיה המגנטית $D_m = 1 / \mu_0 \sigma$ כפרמטר ליציבות מוליכי-העל. בביטויים אלה κ היא המוליכות התרמית של הדגם, ρ ו- C_p הינם צפיפות החומר וקבול החום הסגולי של הדגם, בהתאמה, כאשר $C = \rho C_p$ הינו קיבול החום ליחידת נפח, μ_0 הינו פרמאביליות הריק ו- σ היא המוליכות החשמלית של הדגם. ככל שהיחס $\tau = D_h / D_m$ קטן יותר פיזור החום בדגם איטי יותר, כלומר מוליך העל הינו יציב פחות ותצורות חדירת השטף הדנדריטיות הינן בעלי עדיפות גבוהה יותר. מן הביטויים הנ"ל היחס τ הוא [24-26,14]:

$$\tau = \frac{\mu_0 \sigma \kappa}{C}$$

כאן המקום להעיר שהביטוי ל- τ עשוי לספק הסבר ליציבות היחסית של HTS לפריצות דנדריטיות. הפרמטר התרמי κ / C איננו יכול כנראה לספק הסבר ליציבות של ה- YBCO שבו גודלו של הפרמטר קטן או שווה לזה של מוליכי-העל הקונבנציונאליים המראים אי-יציבות דנדריטית. מאידך, החומרים נבדלים דרמטית בערכה של המוליכות, σ , בנוכחות שדה. חוק Bardeen-Stephen מתאר את השפעת השדה על ההתנגדות בתחום של ה- flux flow כליניארית בשדה [63], כלומר המוליכות החשמלית בתחום זה $\sigma = \sigma_n (B_{c2} / B)$, כש- σ_n היא המוליכות במצב הנורמלי, ו- B_{c2} הוא השדה הקריטי העליון של מוליך העל. כידוע, השדה הקריטי העליון ב-HTS גבוה דרמטית מזה שב-LTS (ראה למשל טבלה 2.2 ב- [64]) ולכן המוליכות החשמלית במצב ה- flux flow גבוהה משמעותית ב-HTS. כתוצאה מכך, τ ב-HTS גבוה יחסית והחומר יציב יחסית לפריצות שטף דנדריטיות בהשוואה למוליכי-העל הקונבנציונאליים.

הדגמים ששימשו לעבודה זו זהים בתכונותיהם, כולם בעלי שכבת YBCO מוליכת על בעובי של 150 nm שגודלו בשיטה זהה, אך ההבדל ביניהם היה המצעים השונים עליהם גודלה השכבה. החומרים השונים ששימשו כמצע לגידול ה- YBCO הם בעלי מוליכות חום שונה ועל כן פיזור החום של הדגמים השונים יהיה שונה. התוצאות שהתקבלו הראו אכן כי ישנו שוני מהותי בתוצאות של ארבעת המצעים השונים. בעוד שלושת המצעים הראשונים, STO, Sapphire, ו- Magnesia, לא הציגו פריצות שטף דנדריטיות עד אשר נעשו בהם פגמים מלאכותיים אשר עודדו את הפריצות עקב הגברת השדה הלוקלית באזור הפגום [52-54], הדגמים שגודלו על המצע הרביעי, YSZ, הציגו פריצות אלו גם ללא יצירת פגמים מלאכותיים אלו. גם כאשר הושגו כבר הפריצות, נראה כי הדגמים בעלי מצע ה- YSZ היה הרבה פחות יציבים כיוון שהציגו מספר רב של פריצות שטף אל תוך הדגם היוצאים ממקורות רבים בשפת הדגם. לעומתם הדגמים בעלי שלושת המצעים האחרים הציגו פריצה ממקור אחד בלבד, כלומר מתוך אותו האזור שנפגם מראש בכדי לעזור לפריצת הדנדריט.

תופעת אי היציבות נאמדת באמצעות טמפרטורת-סף עליונה להתרחשות התופעה ועל ידי ערכי שדה וקצבי העלאת שדה מינימאליים שרק מעליהם יתרחשו פריצות שטף בלתי יציבות. אופיה של המערכת הנסיונית שלנו מאפשר לנו להתייחס בעיקר לטמפרטורת הסף ולקצבי הסף. טבלה 3.1 מסכמת את ההערכים הנ"ל כפי שנמדדו במערכת הנסיונית. בדומה לתוצאות ההדמיות שתיארו את התפלגות השדה השונה בדגמים גם בטבלה משתקפים הבדלים ניכרים בין הדגמים שגודלו על המצעים השונים. טמפרטורות הסף העליונות שהתקבלו מהמדידות עבור הדגמים הציגו אי-יציבות היו 50 K, 60 K, ו-40 K עבור דגמי ה-YBCO בעלי מצע ה-YSZ, STO, וה-Sapphire ו-Magnesia בהתאמה. בחינת המוליכות התרמית של המצעים השונים הראתה כי אכן ישנה התאמה לתאוריה; המוליכות התרמית של מצע ה-YSZ הינה הנמוכה ביותר כשערכה ב 7 K הוא כ-0.05 W/mK [57], בעוד שהמוליכות התרמית של שלושת האחרים גבוהה יותר: 4.5, 300, ו-400-800 W/mK עבור ה-STO [58], Magnesia [60,59], וה-Sapphire [60,59] בהתאמה. בסעיפים שלהלן נראה ביתר פירוט שההבדלים במוליכות החום (המשפיעים גם על ערכו של τ) יכולים להסביר את התוצאות הנסיוניות.

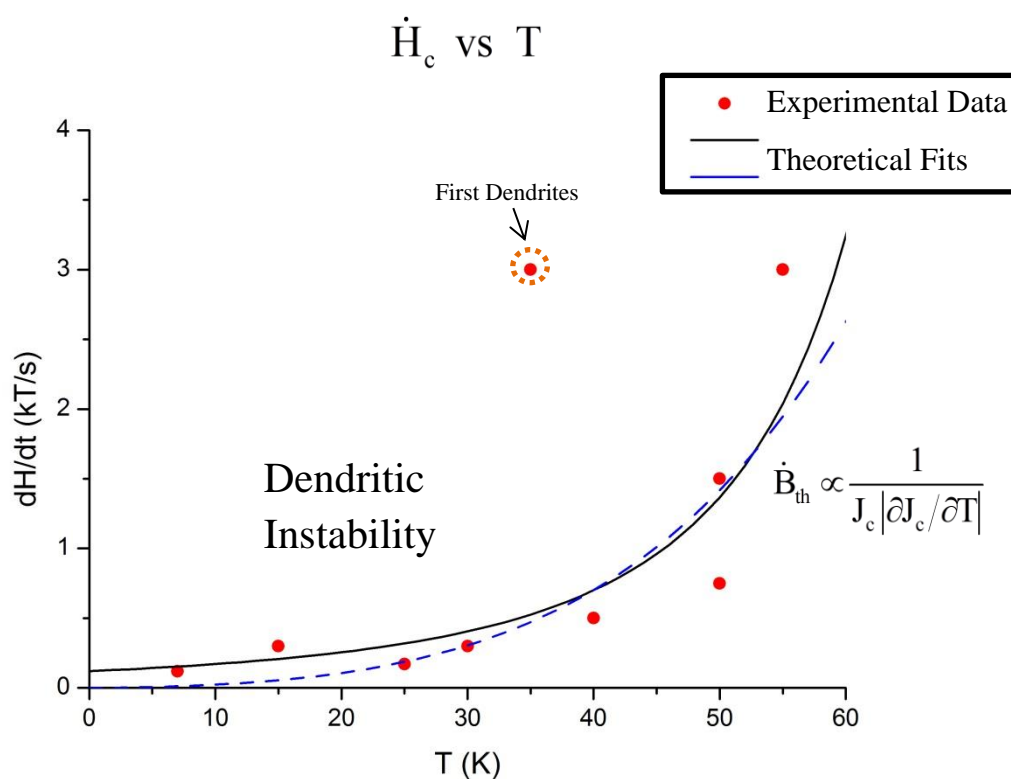
התוצאות שתיארנו - השפעת המוליכות התרמית על היציבות להוצרות דנדריטים - אכן מתאימים לתאוריה של אי-יציבות תרמו-מגנטית [24-29,14] שתוארה בהקדמה בפרק המבוא. בהתאם לפרמטר היציבות $\tau = \mu_0 \sigma C / \alpha$ מוליכות תרמית נמוכה יותר משמעה פיזור גרוע יותר של החום בדגם ועל כן הדגם הינו יציב פחות. הדגמים בעלי מצע ה-YSZ היו בלתי יציבים משמעותית בהשוואה לדגמים בעלי שלושת המצעים האחרים, והם גם בעלי המוליכות התרמית הנמוכה ביותר. כמו כן, מצע ה-STO שהוא בעל המוליכות התרמית הקטנה ביותר הבאה בתור הראה תחום טמפרטורות רחב יותר להתרחשות תופעת אי היציבות, ביחס למצעי ה-Magnesia וה-Sapphire שהם בעלי הולכת חום טובה יותר.

בבחינת התלות בשדות המגנטיים וקצבי עליית השדות המביאים לפריצות של שטף דנדריטי אל מוליכי העל גם כאן הייתה התאמה עקרונית לפרמטר היציבות τ , אך במקרה זה התמונה הייתה ברורה פחות. אמנם תחום קצבי עליית השדה בדגמים המגודלים על מצע ה-YSZ היה רחב מאוד והם הציגו דנדריטים בעליית שדה מאפס ל-60 mT בתחום קצבים שבין 120 T/s לבין 3 kT/s, אך ההבדלים בין שלושת המצעים האחרים היו מעורפלים, ושלושתם הציגו את אי היציבות רק במסגרת קצבי עליית שדה של כקילו טסלה לשניה. במצע ה-Magnesia למרות שהמוליכות התרמית שלו היא בין ה-STO לבין ה-Sapphire, היה קשה יותר להשיג את פריצות השטף האי יציבות, אך להערכתנו זה נובע כנראה מהמחסור בשכבה המקשרת (שכבת ה-Ceria) בין ה-YBCO לבין ה-Magnesia אשר כן נמצאת בדגמים בעלי המצעים האחרים. שכבה זו משנה את המוליכות התרמית הכוללת של הדגם ועל כן יש לבצע מדידות בדגמי Magnesia שיכללו את השכבה הזו וכך השוואה תהיה נכונה יותר.

בשלב הבא בוצעו מדידות מגנטו-אופטיות במטרה למצוא את הקשר בין קצב עליית השדה הקריטי לטמפרטורת הדגם ולאפיין את דיאגרמת הפאזה ליציבות התרמו-מגנטית, הדגמים הנבחרים לצורך מדידות אלו היו דגמי ה- YBCO שגודלו על מצע ה- YSZ מכיוון שדגמים אלו הראו את התחום הרחב ביותר לקצבי עליית השדה עבורם ניתן לבדוק את השפעת הטמפרטורה. הסעיף הבא מציג את מדידות אלו.

3.4 דיאגרמת הפאזה ליציבות דגמי ה-YBCO המגודלים על מצע ה-YSZ

במסגרת המדידות המגנטו-אופטיות שבוצעו בדגמי ה-YBCO נבחנו תנאי הסף להתרחשות פריצות השטף הדנדריטי אל תוך הדגם. המדידות שנציג כאן בוצעו בדגמי ה-YBCO שגודלו על מצע ה-YSZ שהציגו טווח רחב יחסית של קצבי-סף, כפי שנראה להלן. בכל מדידה הדגמים קוררו ללא שדה אל הטמפרטורה הרצויה ולאחר מכן נחשפו לשדה מגנטי שעלה מאפס ל-60 mT בקצב עלייה שונה. קצב הסף התחתון להוצרות דנדריטים תלוי בטמפרטורת הדגם כמתואר באיור 3.8 (עיגולים מלאים, באדום).



איור 3.8: דיאגרמת הפאזה ליציבות התרמו-מגנטית עבור פילם של YBCO בעל מצע YSZ המציגה את התלות בין קצב עליית השדה הקריטי, \dot{H}_c , לבין טמפרטורת הדגם, T , בהם נצפתה חדירת שטף דנדריטית בדגם. הדיאגרמה כוללת את תוצאות המדידות (עיגולים אדומים) וכן את ההתאמות התיאורטיות בהתאם לתיאוריה של Aranson [14]. שני הקווים - הרציף והשבור - מייצגים שתי התאמות שונות בין הזרם הקריטי לבין טמפרטורת הדגם: חוק חזקה ודעיכה אקספוננציאלית בהתאמה (ראה טקסט). האזור שמעל לקווים הינו המצב הבלתי יציב בו הדגם מציג את חדירת השטף הדנדריטי. נקודת המדידה אשר סוטה קצת מקו המגמה התיאורטי הינה המדידה הראשונה בה נצפו דנדריטים (מוקפת בעיגול), לאחר פריצת הדנדריטים הנ"ל הדגם עבר שינוי מהותי בדמות דפקט שנוצר בו בעקבות הפריצה.

”דיאגרמת הפאזה” ליציבות המוצגת באיור 3.8 מציגה את קצב עליית השדה הקריטי, \dot{H}_c , עבורו מתקבלות פריצות השטף הדנדריטיות כתלות בטמפרטורת הדגם. בטמפרטורה מסויימת קצבי עליית שדה גבוהים יותר מ- \dot{H}_c הביאו כאמור את הדגם לאי-יציבות המתבטאת במפולות השטף בדגם, ואילו חשיפת הדגם לשדה מגנטי שעולה בקצב נמוך יותר הציגה חדירה של שטף בחזית גל אחידה.

בסעיף הבא נבחן את דיאגרמת הפאזה ואת התאמתה לעבודות תיאורטיות שבחנו את אי-היציבות התרמו-מגנטית.

דיון

במסגרת העבודות התאורטיות שעסקו באי-היציבות התרמו-מגנטית בחנה קבוצת החוקרים של Aranson ושות' את חדירת השטף הדנדריטי לפילמים דקים של מוליכי-על [14]. חוקרים אלה בחנו את דינאמיקת השטף הדנדריטי המבוססת על היחס בין הדיפוזיה המגנטית לדיפוזיה התרמית תוך מתן דגש לאי-הלוקליות בדיפוזיה במגנטית בפילמים דקים. המודל שהציגו כלל תחזית לקצב עליית שדה מגנטי קריטי, \dot{B}_{th} , אשר רק מעליו הדגמים יציגו את פריצות השטף הדנדריטיות. קצב עליית השדה הקריטי הנ"ל היינו תלוי טמפרטורה בכך שהוא

$$\dot{B}_{th}(T) \propto \frac{1}{J_c(T) \left| \frac{\partial J_c(T)}{\partial T} \right|} \quad (3): \text{כפי שהוצג במשוואה (3)}$$

הזרם הקריטי במוליכי העל קטן עם עליית הטמפרטורה, ולכן קצב עליית השדה הקריטי להופעת חדירת השטף בתצורה הדנדריטית צפוי לגדול עם עליית טמפרטורת הדגם. הקווים בציר 3.8 מתארים את התלות התאורתית של קצב הסף בטמפרטורת הדגם בהתאם למשוואה (3). ההתאמות התאורטיות המוצגות באיור 3.8 מציגות שתי התאמות שונות המקשרות בין הזרם הקריטי לבין טמפרטורה, הקו הרציף השחור מניח תלות ריבועית בין הזרם הקריטי לבין הטמפרטורה, כלומר: $J_c(T) = J_{c0}(1 - T/T_c)^2$. (בספרות נמצאו סימוכין למעבר מתלות ליניארית לתלות מעריכית של 1.5 כתלות בתחום הטמפרטורות של הדגם [65-67] אך תלות כזאת נותנת התאמה פחות טובה לתוצאות). הקו השבור הכחול מניח תלות אקספוננציאלית בין הזרם הקריטי של הדגם לבין הטמפרטורה שלו באופן הבא: $J_c(T) = J_{c0} \exp(-A\sqrt{T/T_c})$. תלות כזו נמצאה בעבר במדידות של הזרם הקריטי בפילמים דקים של YBCO [68]. שני המקרים מציגים התאמה איכותית טובה בין התוצאות הנסיוניות לבין הניבויים התאורטיים. במיוחד, העלאת הטמפרטורה של הדגם מביאה לירידה בזרם הקריטי שלו ולכן נדרשת חשיפה לשדה שעולה בקצב מהיר יותר בכדי להביא את הדגם לאי-יציבות.

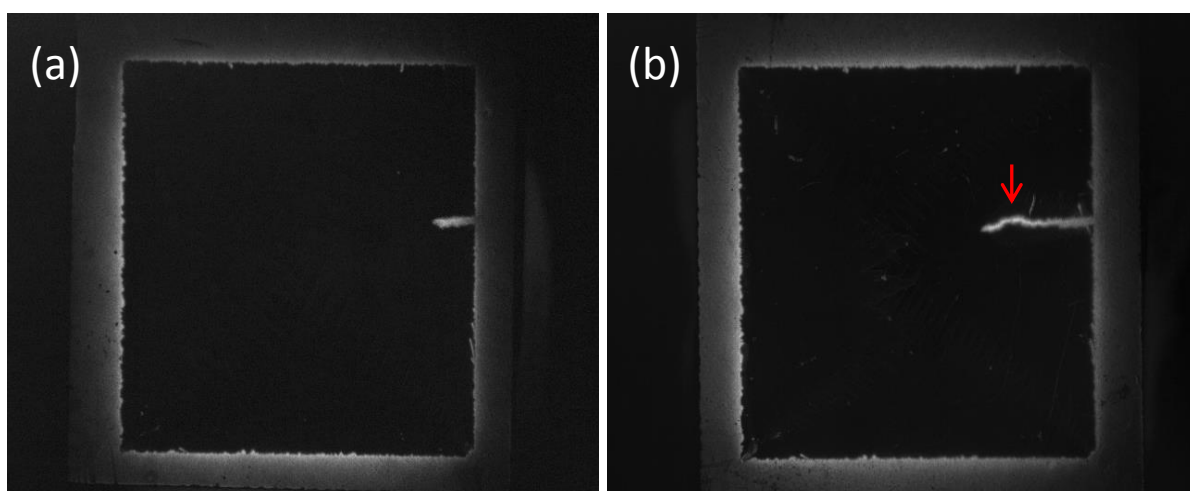
הגרף מציג גם נקודת מדידה אחת שסוטה מן ההתאמה התיאורטית, נקודה זו מייצגת את התוצאה הנסיונית לפעם הראשונה בה חדר השטף הדנדריטי לדגם. לאחר פריצה זו נוצר דפקט בדגם, אשר יצר הגברה אפטיקבית של השדה באזור [52-54], אותו האזור ממנו פורץ השטף במדידות הבאות. בהתייחס למדידות קצב השדה הקריטי כתלות בטמפרטורת הדגם, להוציא את הפריצה הראשונה הנ"ל, המגמה בסה"כ נשמרה ונתקבלה התאמה טובה למודל של ארנסון [14]. ראוי להדגיש כי גם במדידות הבאות ראינו שינויים נוספים ופגמים נוספים שנוצרו בדגמים במהלך המדידות אך להערכתנו במהלך הפריצה הראשונה התקבל השינוי הדרמטי ביותר.

תוצאות המדידות המגנטו-אופטיות חשפו, איפא, נזקים בלתי הפיכים שנגרמו לדגמים במהלך הפריצות של השטף הדנדריטי. נזקים אלה גם הביאו לכדי שינויים בתוצאות, והתנאים להופעת חדירות השטף הבלתי יציבות השתנו כך שהטמפרטורות וקצבי הסף עבורם התקבלו פריצות דנדריטיות השתנו במהלך הנסיון. בסעיפים הבאים נציג את הנזקים הללו ונעסוק בהשלכות החשובות שלהם.

3.5 נזקים פרמננטיים שנגרמו בדגמי ה-YBCO כתוצאה מפריצות השטף המגנטי

בתחילתה ובסופה של כל סדרת ניסויים בצענו מדידה חוזרת לבדיקת איכות הדגם, ע"י חשיפת הדגם לשדה נמוך יחסית אליו הגענו לאחר העלאת שדה בקצב קונבנציונלי.

איור 3.9 מציג דוגמא לבדיקה של דגם YBCO המגודל על מצע Sapphire כאשר (a) הינה תמונה שנלקחה בתחילתה של סדרת ניסויים ו-(b) הינה תמונה שנלקחה לאחר מספר חשיפות לשדה שגרמו לפריצות שטף מגנטי בלתי יציבות.

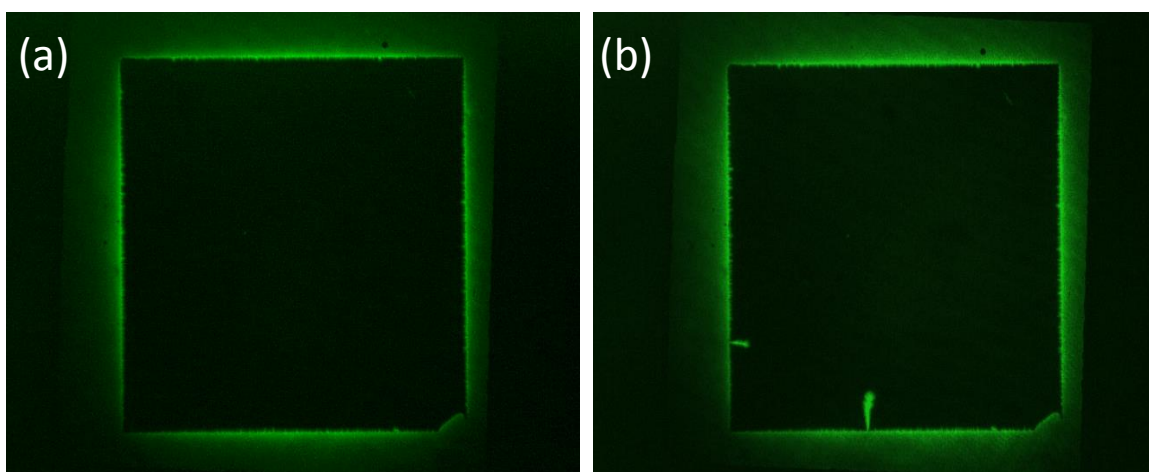


איור 3.9: תמונות מגנטו-אופטיות של דגם YBCO בעל מצע Sapphire אשר מציגות את התפתחות הדפקט בדגם. (a) מציג תמונה מגנטו-אופטית שנלקחה ב- 7 K ובנוכחות שדה של 5 mT, ניתן להבחין בטיב הדגם הממסך את השדה בצורה הומוגנית פרט לאזור פגום בשפה הימנית של הדגם. פגם זה הינו חתך מלאכותי אשר בוצע באמצעות מסור חוט בכדי לעודד פריצות שטף דנדריטיות. (b) תמונה מגנטו-אופטית שנלקחה בתנאים זהים ומציגה את התפתחות החתך שהתקבלה כתוצאה מסדרת מדידות בהן הדגם נחשף לשדות שהביאו לפריצות שטף דנדריטיות. החץ האדום מצביע על אזור שנבחן אח"כ גם באמצעות AFM ו-EM.

באיור 3.9(a) מוצג הדגם לאחר קירור ל- 7 K וחשיפה לשדה של 5 mT. ניתן להיווכח בטיב הדגם אשר ממסך בצורה הומוגנית את השדה פרט לאזור הפגום המלאכותי הנמצא בשפה הימנית שלו. פגם זה הינו חתך מלאכותי שנעשה באמצעות מסור חוט, על מנת לעודד פריצות שטף דנדריטיות אל תוך הדגם. לאחר מכן בוצעה סדרה של מדידות הכוללות חשיפות לשדה מגנטי גבוה ובקצבים מהירים. חשיפות השדה הללו הביאו גם לכדי חדירות שטף בלתי יציבות, אחת מן חדירות השטף הללו מוצגת באיור 3.5(b). לאחר סדרת המדידות נבחן טיבו של הדגם בשנית ונראה כי החתך התארך ונוצר נזק נוסף, פרמננטי, בדגם (3.9(b)). החץ האדום שמופיע באיור

מצביע על האזור הפגום בדגם שנבדק בשלב מאוחר יותר בשתי דרכים אותם אתאר בסוף סעיף זה.

נזקים דומים נוצרו גם בדגמים אשר לא כללו תחילה פגמים מלאכותיים כמו בדגם זה. דוגמא לכך אפשר לראות באיור 3.10 אשר מציג דגם YBCO בעל מצע YSZ אשר לפני חשיפות לשדה שכללו חדירה של שטף בתצורות דנדריטיות לא היו בו פגמים ואילו לאחר חשיפות אלו נוצרו בדגמים נזקים יש מאין.



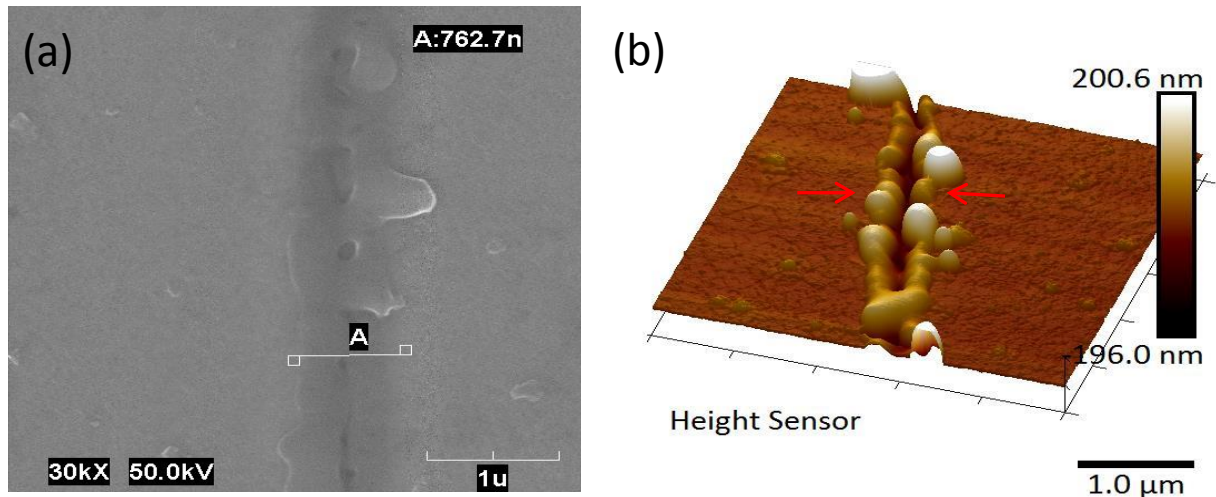
איור 3.10: נזקים בדגם YBCO המגודל על מצע YSZ שנגרמו במהלך המדידות במערכת המגנטו-אופטית. שתי התמונות נלקחו ב- 7 K ובנוכחות שדה מגנטי של 10 mT. ב- 3.10(a) הדגם ללא דפקטים, לפני שהציג פריצות דנדריטיות כמו אלו הנראות באיור 3.3. ההדמיה המוצגת ב- 3.10(b) ממחישה את הפגמים אשר נוצרו בדגם בעקבות פריצות השטף הללו.

התוצאות הנראות באיור 3.10 מדגימות את הנזק הנוצר כתוצאה ממפולות השטף המגנטי החודרות אל הדגם. בדגם הנראה באיור זה לא היו פגמים לפני החשיפה לשדות המהירים וניתן לראות את מיסוך השדה ההומוגני באיור 3.10(a). לאחר סדרת מדידות שכללו פריצות שטף דנדריטי נוצרו בדגם שני פגמים הנראים בשפתו התחתונה ובשפתו השמאלית של הדגם (3.10(b)).

חשוב לציין כי במהלך המדידות השתנו תנאי הסף (טמפרטורות הסף ו/או קצבי השדה שנדרשו על מנת לייצר דנדריטים). שינויים אלו נבעו ככל הנראה מהשינויים הפיזיים שהדגמים עברו כתוצאה מהנזקים שנגרמו להם במהלך המדידות.

ככדי לבחון את הפגמים שנוצרו במהלך המדידות בדקנו את אחד הדגמים - דגם ה-YBCO שגודל על מצע Sapphire-הן במיקרוסקופ אלקטרוני (EM) והן באמצעות AFM-

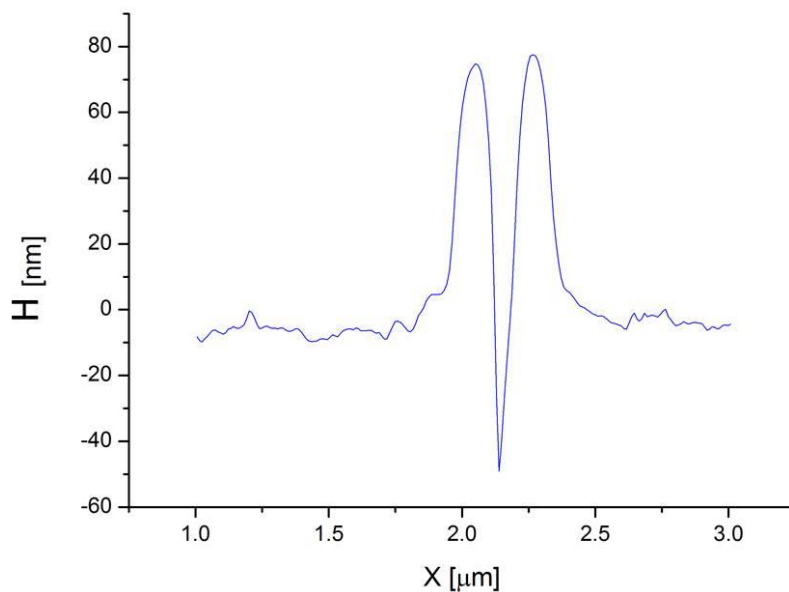
(Atomic Force Microscope). הדגם והאזור שנבדק מופיע באיור 3.10(b). (הסריקות בוצעו בכיוון החץ האדום באיור 3.10(b)). התוצאות שהתקבלו משתי הסריקות מוצגות באיור 3.11.



איור 3.11: סריקות המציגות את הנזקים שנגרמו לדגם ה-YBCO בעקבות פריצות השטף הדנדריטי. 3.11(a) מציג תמונה מתוך סריקה במיקרוסקופ אלקטרוני ובה ניתן לראות כי רוחב התעלה שנוצרה הוא קרוב ל-800 nm. 3.11(b) הינה תמונה תלת ממדית של האזור שנסרק באמצעות ה-AFM, ניתן להבחין בתעלה שנוצרה וכן בהפרשי הגבהים שנוצרו סביבה. החצים האדומים מצביעים על האזור בו נלקח גם פרופיל דו ממדי.

התוצאות המוצגות באיור 3.11 ממחישות את הנזקים שנגרמו לדגם כתוצאה מפריצות השטף הבלתי יציבות. 3.11(a) ו- 3.11(b) התקבלו מסריקת ה-EM וה-AFM בהתאמה. ניתן ללמוד מהתמונות כי הנזק שנגרם הינו בדמות של תעלה ברוחב הקרוב ל-800 nm אשר החומר שנחצב ממנה נותר בגבולותיה. נלקחה גם תמונה דו-ממדית שבחנה את פרופיל השטח בתעלה (החצים האדומים מצביעים על המיקום בו נלקח הפרופיל). איור 3.12 מציג את פרופיל השטח הדו-ממדי.

באיור 3.12 מוצג גרף של גובה פני החומר בדגם בנומטרים כפונקציה של המיקום הנסרק במיקרומטרים. ניתן להבחין בתעלה שנוצרה בעקבות מפולות השטף בדגם, תעלה שבאזור זה מגיעה לעומק של 50 nm וסביבה נאסף חומר המגיע לגובה של 80 nm מעל לפני השטח.



איור 3.12: פרופיל התעלה שנחצבה בשכבת ה-YBCO שהתקבל באמצעות סריקת ה-AFM. הגרף מציג את גובה החומר לפי המיקום שנסרק. בקטע זה התעלה הינה בעומק של 50 nm וסביבה נאסף חומר בגובה של 80 nm. תעלה זו נגרמה כתוצאה מפריצות השטף הדנדריטיות.

בסעיף זה הצגנו את היווצרות הנזקים בדגמי ה-YBCO בעקבות פריצות השטף הדנדריטיות. בסעיף הבא נדון בגורמים ובהשלכות של פגמים אלה.

דיון

אחת מן החשיפות המפתיעות בעבודת מחקר זו הינה העובדה כי הדגמים נפגמים באופן מהותי במהלך החשיפה שלהם לשדות מגנטיים, חשיפה המביאה לכדי פריצות שטף דנדריטי. חשוב להדגיש כי השינויים והנזקים שהתחוללו בדגמים קרו אך ורק כאשר נצפו מפולות שטף בדגמים. במידה ובוצעה חשיפה לשדה אשר לא הביאה את הדגם לאי יציבות אזי גם לא נצפו בו נזקים ופגמים שלא היו בו קודם לכן, אך במהלך המדידות בהן כן נצפו פריצות שטף בלתי יציבות בהחלט נצפו פגמים שלא היו בדגם קודם כפי שהוצג בדוגמאות מהסעיף הקודם. קשה לקבוע אם כל אחת ואחת מן הפריצות בעצמה כבר גורמת לנזק, ברם אין ספק כי לאחר מרביתן נצפו נזקים מהותיים בכל מגוון דגמי ה-YBCO שנבחנו.

התופעה של נזקים בלתי הפיכים כתוצאה ממפולות שטף לא נצפתה עד כה במוליכי-על, גם לא באלה שקל יחסית להביאם לאי-יציבות תרמו-מגנטית, להוציא המקרה האחד והיחיד שדווח ע"י ליידרר ושות' [62] שדיווחו על נזק אך לא הצליחו לשחזר את התופעה. בעבודה זו אנו

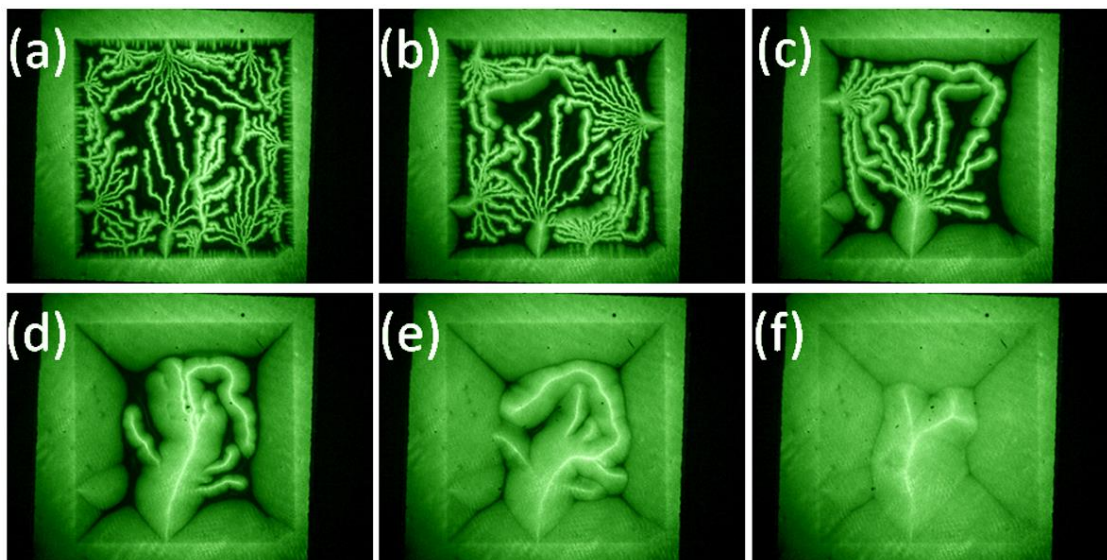
חושפים לראשונה כי תופעה זו הינה שכיחה למדי בעבור דגמי YBCO בהן מתרחשות פריצות דנדריטיות. העובדה שנוקים לא נצפו לאחר חדירת דנדריטים בחומרים אחרים קשורה אולי לעובדה שבניסויים בחומרים אלו קצב העלאת השדה המגנטי היה נמוך יחסית. יתכן גם כי קיבול החום הגבוה יחסית של ה-YBCO מסייע ליצירת נוקים אלו כיוון שקצב הדיפוזיה הוא נמוך יותר וכמות החום המצטבר באזור הפריצה היא גבוהה.

הוזכר כבר קודם כי בעת תכנון אפליקציות המבוססות על חומרים מוליכי-על ישנו צורך כי החומרים ישמרו על יציבות והתנהגותם תהה צפויה מראש. ברור אם כן שפריצות שטף בלתי יציבות שהתנהגותן לא צפויה, לא יהיו רצויות ביישומים שכאלו. על אחת כמה וכמה, כאשר פריצות אלו גורמות לנזקים בלתי הפיכים בחומרים מוליכי העל, אזי לא רק שהן עלולות להפריע לתפקוד הנורמלי של אפליקציות המבוססות על החומרים הללו אלא הפריצות אף עשויות להרוס את האפליקציות כליל כך שלא תהה אפשרות לעשות בהן שימוש כלל.

הנוקים שהוצגו בסעיף הקודם הופיעו באזורים אשר שמשו כמקור לפריצות השטף, דהיינו ערוצים שבהם היה ריכוז שטף גבוה מאוד שהביא למפולות שטף בתצורתן הדנדריטיות. במקורות אלו, בהן מתקיימת תנועת השטף המרבית, הטמפרטורה הלוקאלית תעלה גם היא בצורה חדה מאוד. העלייה הלוקאלית החדה והרגעית בטמפרטורה בפילם מוליך העל התקבלה גם ע"י חישובים נומריים שנעשו בעבר [61]. החוקרים הראו כי תנועת שטף מגנטי מביאה לעליית טמפרטורה שמשחררת פלקסונים נוספים לנוע וכן הלאה, כך שהאזור בו מתקיימת תנועת השטף המרבית הינו גם המיקום בדגם בו הטמפרטורה מקסימאלית. באותו האופן, תמונת ה-AFM מרמזת על עליית הטמפרטורה החדה באזור כתהליך שנראה כמעין התכה של החומר בערוץ הזרימה של השטף, ונראה לכאורה שהחומר נזרק מערוץ הזרימה אל שוליה של התעלה שנתרה במקום.

3.6 שינוי בתצורות השטף הדנדריטיות כתלות בטמפרטורת הדגם

תוצאות מעניינות נוספות קשורות לתלות בין תצורותיהן של פריצות השטף לבין טמפרטורת הדגם. התוצאות הראו שינוי סיסטמתי באופי החדירה כך שעם העלייה בטמפרטורת הדגם חלה ירידה במספר מקורות הפריצה של השטף וכן ירדו גם מספר הענפים היוצאים מכל ממקור ומקור. לעומת זאת אורכו ורוחבו של כל ענף באופן אינדיבידואלי עלה עם עליית הטמפרטורה. באיור 3.13 מוצגת דוגמה לתלות בין תצורות חדירת השטף הדנדריטי לבין טמפרטורת הדגם.

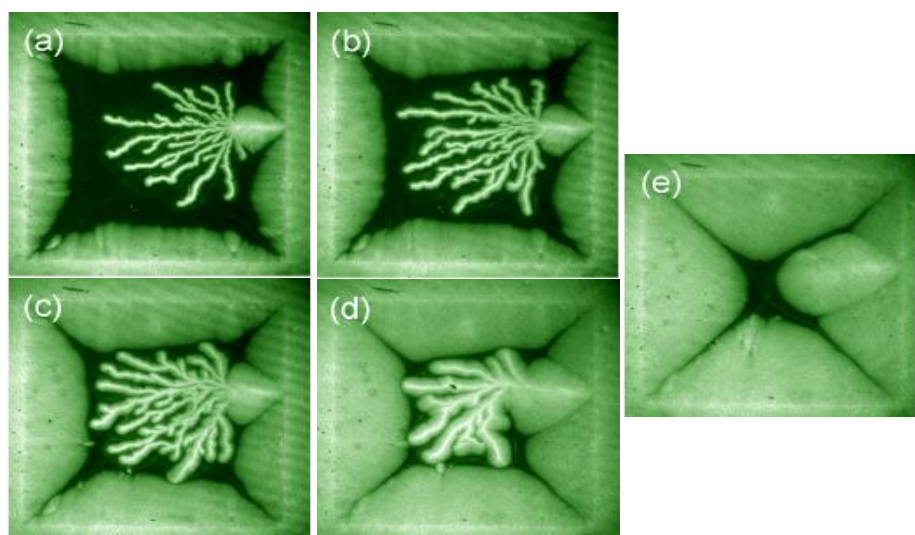


איור 3.13: הדמיה מגנטו-אופטית בדגם YBCO בעל מצע YSZ המציגה את השינויים בתצורות חדירת השטף הדנדריטי כתלות בטמפרטורת הדגם. בכל התמונות הדגם נחשף לשדה מגנטי שעלה מאפס ל-60 mT בקצב עלייה של 3 kT/s, זאת לאחר שקורר ללא שדה אל הטמפרטורות: 7, 16, 26, 36, 46, ו-56 K עבור התמונות a, b, c, d, e, ו-f בהתאמה.

האיור מציג את השינויים בתצורות החדירה הדנדריטיות כתלות בטמפרטורת הדגם בפילם YBCO בעל עובי של 150 nm המגודל על מצע של YSZ. בכל אחת מן המדידות הדגם נחשף לשדה מגנטי חיצוני של 60 mT כשקצב עליית השדה מאפס ל-60 mT היה 3 kT/s, כמו כן לפני כל מדידה הדגם חומם אל מעל הטמפרטורה הקריטית, ולאחר מכן קורר ללא שדה חיצוני אל הטמפרטורה הרצויה. טמפרטורת הדגם בהדמיות המוצגות באיור 3.13(a)-(f) הייתה 7, 16, 26, 36, 46, ו-56 K בסדר עולה כאשר 3.13(a) הינה התמונה בה בדגם נמצא בטמפרטורה הנמוכה ביותר ו-3.13(f) מייצגת את הטמפרטורה הגבוהה ביותר. קל להבחין בשינויים בהתפלגות האינדוקציה בדגם בכל אחת מן הטמפרטורות כאשר עלייה בטמפרטורה הובילה

לירידה במספר מקורות הפריצה במקביל לירידה גם במספר הענפים היוצאים מכל מקור ספציפי. לעומת זאת, אורכם ורוחבם של הענפים שאכן מצליחים לפרוץ על אף עליית הטמפרטורה גדל, והם הופכים לארוכים ורחבים יותר ויותר תוך עליית טמפרטורת הדגם. ניתן גם לראות כי במקביל לתצורות החדירה הבלתי יציבות התקיימה גם חדירה קלאסית של שטף בחזית גל אחדיה הנכנס משפות הדגם, ועם עליית הטמפרטורה כך גדל גם עומק החדירה של השטף בעל חזית הגל האחידה.

מן המדידות שתוארו בקטע הקודם ניתן גם לחלץ את טמפרטורות הסף מעליהן הדגם חזר להציג חדירת שטף קלאסית, ללא פריצות השטף דנדריטיות. בדגם המוצג באיור 3.13 טמפרטורה זו הייתה כ- 60 K. עם ההתקרבות לטמפרטורת הסף הנ"ל נשאר רק מקור בודד עם מספר ענפים מצומצם מאוד, כשגם אורכם של ענפים אלו התקצר משמעותית. דוגמא נוספת למדידות התלות בין תצורות חדירת השטף הדנדריטיות לטמפרטורת הדגם, לרבות טמפרטורת הסף שבה לא התקיימה פריצת השטף הדנדריטי, ניתן לראות באיור 3.14. איור זה מציג את השינויים בפריצת השטף תוך עליית הטמפרטורה עבור דגם YBCO שגודל על מצע Sapphire. התמונות נלקחו בטמפרטורות של 13, 20, 30, 40, ו- 42 K עבור תמונות a-f בהתאמה, כאשר בכל אחת המדידות הדגם נחשף לשדה שעלה מאפס ל- 60 mT בקצב של 3 kT/s, לאחר שקורר ללא שדה אל הטמפרטורה המבוקשת. בדגם זה לא חלה ירידה במספר מקורות הפריצה עם עליית הטמפרטורה מכיוון שמלכתחילה היה רק מקור פריצה אחד, כתוצאה מהדפקט המלאכותי שנעשה ע"י החיתוך במסור החוט. מספר המקורות נשאר זהה עד להגעה לטמפרטורת הסף שמעליה לא התרחשה פריצה כלל. ניתן לראות כי גם במקרה זה חלה ירידה במספר הענפים שיוצאים מתוך המקור אך רוחבם של הענפים גדל תוך עליית הטמפרטורה. טמפרטורת הסף במקרה זה היא כ- 40 K.



איור 3.14: (a-d) חדירות שטף דנדריטי בפילם YBCO בעל מצע Sapphire בטמפרטורות 13, 20, 30, ו- 40 K בהתאמה. הדגם קורר ללא שדה אל הטמפרטורה הרצויה ואח"כ נחשף לשדה שעלה ל- 60 mT בקצב של 3 kT/s. ב- 3.14(e) טמפרטורת הדגם הייתה 42 K והדגם חזר להציג את המצב הקלאסי של חדירה בחזית גל אחידה.

תוצאות המדידות שבחנו את השינויים בתצורות חדירת השטף הדנדריטי כתלות בטמפרטורת הדגם חשפו מספר שינויים באופי החדירה, לרבות ירידה במספר מקורות הפריצה עם עליית טמפרטורת הדגם, ירידה במספר הענפים עם עליית הטמפרטורה, שינויים באורכם ורוחבם של ענפי הדנדריטים, וכן שינויים בעומק החדירה של השטף ההומוגני בעל חזית הגל האחידה עד להגעה לטמפרטורת הסף מעליה לא התרחשו פריצות דנדריטיות כלל.

בנוגע לשינוי בעומק החדירה של השטף בעל חזית הגל האחידה, התנהגות זו תואמת את ההתנהגות הקלאסית המצביעה על החלשות אנרגית הלכידה בטמפרטורות הגבוהות יותר ובכך קל יותר לשטף להתקדם אל פנים הדגם. ניתן להניח כי גם השינוי באורכם וברוחבם של ענפי הדנדריטים עם עליית הטמפרטורה נובעת מסיבות דומות.

אם נתמקד בירידה במספר המקורות לפריצות השטף הדנדריטי, ירידה אשר נראתה בדגמי ה-YBCO שגודלו על מצע ה-YSZ, מגמה זו נצפתה בעבר גם במוליכי העל מטמפרטורות נמוכות בעבודות שנעשו ע"י יוהנסן ושות' [2,27]. מחקרים אלו שכללו תוצאות מהדמיות מגנטו-אופטיות ב-MgB₂ וכן סימולציות נומריות מצאו גם הם כי חלה ירידה במספר מקורות הפריצה ככל שטמפרטורה הדגם הייתה גבוהה יותר. הסבר אפשרי לירידה במספר מקורות הפריצה נוגע למוליכות התרמית של הדגמים אשר יורדת עם ירידת הטמפרטורה, כלומר בטמפרטורה נמוכה יותר פיזור החום גרוע יותר והדגמים יציבים פחות.

לעומת זאת, בניגוד להתאמה לתוצאות העבר באשר לירידה במספר מקורות הפריצה, ירידת מספר הענפים עם עליית טמפרטורת הדגם אינה תואמת לתוצאות אשר נצפו בעבר. בתוצאות העבר נצפתה עליה במספר הענפים היוצאים מכל מקור פריצה עד להגעה לטמפרטורת הסף שמעליה לא התרחשות פריצות כלל. בעוד שב-LTS הדנדריטים שנצפו בטמפרטורות הנמוכות היו כדמות אצבעות ללא ענפים והסתעפויות רבות, בדגמי ה-YBCO תצורות השטף הדנדריטי כללו עצים מרובי ענפים, ולהפך, ה-YBCO הראה פריצות בדמות אצבעות ללא ענפים רבים בטמפרטורות הקרובות יותר לטמפרטורת הסף של תופעת אי היציבות, בשעה שב-LTS נראו עצים בעלי הסתעפויות רבות (דוגמא לתוצאות ב-LTS ניתן לראות באיור 3.15).



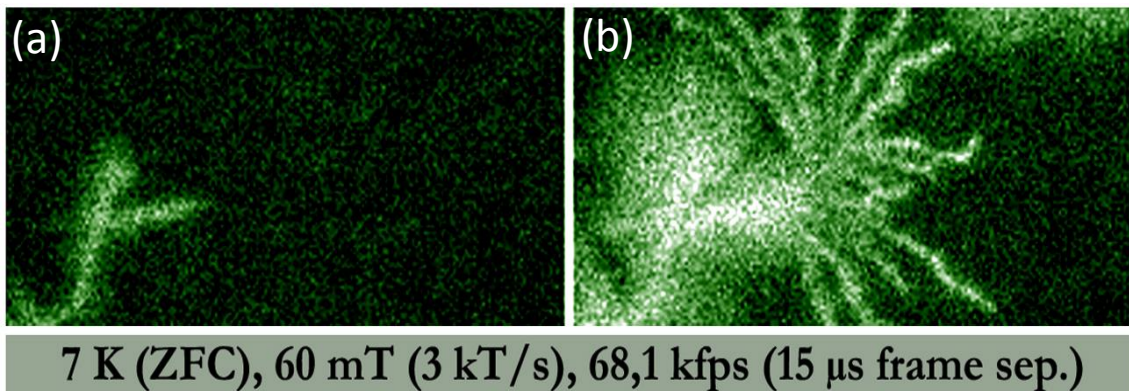
איור 3.15: הדמיה מגנטו-אופטית של דגם MgB_2 הבוחנת את מורפולוגיית השטף הדנדריטי כתלות בטמפרטורת הדגם. ניתן לראות כי בטמפרטורות נמוכות יותר הפריצות היו כאצבעות ללא ענפים והסתעפויות רבות ואמנם עליית הטמפרטורה הביאה לירידה במספר מקורות הפריצה אך מספר הענפים בכל פריצה גדול כך שהתקבלו עצים מרובי ענפים. [27]

איור 3.15 ממחיש את השינויים בתצורות השטף הדנדריטי כלתות בטמפרטורת הדגם עבור פילם של MgB_2 . ניתן לראות את ההתאמה לתוצאות שהוצגו באיור 3.13 עבור דגם ה-YBCO בכך שחלה ירידה במספר מקורות פריצת השטף אל תוך הדגם. לעומת זאת מהשוואת התמונות אפשר להבחין גם בחוסר ההתאמה בין שני המקרים בנוגע למספר הענפים. בעוד שבאיור 3.13 (דגם ה-YBCO) מספר הענפים לפריצה הלך והצטמצם תוך התקרבות לטמפרטורה הסף, באיור 3.15 (MgB_2) מספר ענפים בכל אחת מן הפריצות עלה.

התלות של התצורות הדנדריטיות ב-YBCO מדווחות לראשונה בעבודה זו. התוצאות מצביעות, כאמור, על התנהגות שונה בין LTS לבין HTS בכל הנוגע למספר הענפים הדנדריטיים בטמפרטורות גבוהות. נימוק אפשרי לירידה שחלה במספר הענפים בדגמים שלנו יכול להיות קשור לטמפרטורות הגבוהות יחסית בהן הדנדריטים נצפים. כאשר הפריצות מתרחשות בטמפרטורות גבוהות שטח הדגם הממוסך קטן יחסית בעקבות חדירת השטף ההומוגני העמוקה יותר דרך שפות הדגם, ועל כן ישנה הגבלה על התפתחותם של הדנדריטים לעצים קטנים יותר.

3.7 משך הזמן להתפתחות הדנדריט מרגע הפריצה

במהלך המדידות ניסינו לבחון גם את משך הזמן להתפתחות הדנדריט. לצורך כך הקטנו את רזולוציית המצלמה והתמקדנו בדנדריט ספציפי; הקטנת הרזולוציה הנ"ל אפשרה לנו לצלם בקצב גבוה מאוד של 68,100 פריימים לשנייה. באיור 3.16 מוצגות שתי תמונות צמודות מתוך סרט הצילום של המדידה כאשר חלון הזמן ביניהם הוא $15 \mu\text{s}$.



איור 3.16: הדמיה מגנטו-אופטית הבוחנת את משך זמן התפתחות הדנדריט בדגם YBCO. משך הזמן שחלף בין תמונה (a) לתמונה (b) הוא $15 \mu\text{s}$, במהלכן הדנדריט הספיק כבר להתפתח בשלמותו.

האיור מראה שתי הדמיות עוקבות של דגם YBCO לאחר שקורר לטמפרטורה של 7 K ללא שדה חיצוני ואח"כ נחשף לשדה שעלה מאפס ל-60 mT בקצב של 3 kT/s. באיור רואים כי במשך הזמן שחלף בין תמונה (a) לתמונה (b) הדנדריט כבר הספיק להתפתח בשלמותו. החלק המואר בתמונה (a) משקף פריצה אל פגם טבעי בדגם אשר ממנו פרץ הדנדריט. (איכות התמונות הירודה נובעת מהקטנת הרזולוציה המרחבית בכדי לאפשר העלאה של קצב הצילום. איכות זו מספיקה כדי לצפות בהתפתחות השטף).

המסקנה מאיור 3.16 ברורה: הזמן הדרוש להתפתחות מלאה של הדנדריט קטן מרזולוציית הזמן של הניסוי ($15 \mu\text{s} < 1/68,000$ שנייה). יש, כמובן, עניין רב במעקב אחר הדינמיקה של הדנדריט אך עד כה לא צלחו הנסיונות להקטין את קצב ההתפתחות שלו ע"י שינויים בפרמטרים כמו טמפרטורה, גודל השדה המגנטי וקצבי עליית השדה, ושינויים בתכונות הדגם כדוגמת השינוי במצעים עליהם החומר מוליך העל מגודל.

למרות הניסיון לצפות בהתפתחות הדנדריטים, ועל אף היכולת של המצלמה שלנו להגיע לקצבי צילום גבוהים ביותר, אין לנו את היכולת ללמוד על התפתחותם של הדנדריטים אלא רק להצביע על חסם עליון של כ- $15 \mu\text{s}$ למשך הזמן בהם הדנדריטים מתפתחים בדגמי ה-YBCO שנבדקו. מסקנה זו תואמת את תוצאות הניסוי של ליידרר ושות' [11] אשר בדקו את מהירות התקדמות הדנדריטים ב-YBCO. טווח המהירויות שנמצאו הינו בין 10^4 m/s לבין 10^5 m/s . כלומר, בדגמים שלנו שגודלם $4 \times 4 \text{ mm}$, משך הזמן להתפתחות דנדריט מקצה אחד של הדגם אל קצהו השני יהיה לא יותר מ- $t = x / v = 4 \cdot 10^{-3} / 10^4 = 4 \cdot 10^{-7} = 400 \text{ ns}$. קצב הצילום שלנו הוא כמובן איטי בהרבה מקצב התפתחות הדנדריטים הנובע מהחשבון הנ"ל.

פרק 4 – סיכום ומסקנות

בעבודה זו חקרנו את תצורות חדירת השטף האי-יציבות בדגמי YBCO, מוליכי-על בטמפרטורות גבוהות, בעזרת מערכת מגנטו-אופטית חדישה המבוססת על עקרון Faraday. הדגמים שנמדדו הם שכבות דקות של YBCO אשר גודלו על ארבעה מצעים שונים: Sapphire, Magnesia, STO, ו-YSZ. תוצאות המדידות חשפו לראשונה פריצות שטף מגנטי בתצורה דנדריטית אל דגמי YBCO בדרך קונבציונאלית של העלאת שדה מגנטי חיצוני בלבד, ונבדקו התנאים המאפשרים את קיומן של פריצות השטף, תוך שימת דגש לשינויים שנובעים מהמצעים השונים המשפיעים על פיזור החום בכל דגם. בעבודת המחקר נמצאו מגוון של תוצאות חדשות ולהלן סיכומן:

I. חדירת שטף מגנטי בתצורה דנדריטית אל דגמי YBCO

לראשונה נצפו פריצות שטף דנדריטיות אל HTS בצורה קונבציונאלית של העלאת שדה מגנטי חיצוני בלבד. קצבי עליית השדה היו מהירים מאוד (בסדרי גודל של kT/s), והם הביאו לכדי אי-יציבות תרמו-מגנטית שהתבטאה בפריצות של שטף לדגמים השונים. פריצות אלו התאפשרו בזכות קצב עליית השדה המהיר (השקול לשדה חשמלי גבוה שעולה על E_C , שדה הסף מעליו הדגם מגיע למצב של אי-יציבות). הפריצות נצפו מתחת לטמפרטורת סף שמעליה הדגם חוזר להציג את חדירות השטף הקלאסיות בהתאם למודל Bean. תוצאות אלו הן עדות לכך שתופעת אי היציבות התרמו-מגנטית אינן נחלתם של מוליכי על מטמפרטורות נמוכות בלבד; התופעות עשויות להופיע גם ב-HTS.

II. השפעת המצעים השונים על תצורת חדירת השטף המגנטי

לארבע המצעים השונים מוליכות חום שונה, ועל כן פיזור החום בכל אחד מהמצעים הוא אחר. דיפוזיית חום איטית יותר גורמת לאי יציבות גדולה יותר בדגמים, והיא מביאה לכדי עליות טמפרטורה לוקאליות המאפשרות פריצות רבות יותר של שטף אל תוך הדגם. פריצות אלו באו לידי ביטוי במיוחד בדגמי ה-YBCO בעלי מצע ה-YSZ, שהוא בעל המוליכות התרמית הנמוכה ביותר. ביתר הדגמים, להם הייתה מוליכות תרמית גבוהה יותר, פריצות השטף הדנדריטיות הושגו רק לאחר שהוספנו לדגמים פגמים מלאכותיים שנעשו בעזרת מסור חוט. פגמים אלו הביאו להגברת שדה לוקאלית באזור הפגום והיוו כמקור לפריצות השטף הדנדריטי. טמפרטורות הסף השונות עבור הדגמים בעלי המצעים השונים היוו עדות נוספת

להשפעת המצעים השונים על התוצאות. נמצאה התאמה בין טמפרטורות הסף הללו, מעליהן הדגמים הפסיקו להראות התנהגות בלתי יציבה, לבין המוליכות התרמית של מצע הדגם. התאמה עקרונית נמצאה גם בהקשר לקצבי הסף לעליית השדות הנדרשים על מנת להביא את הדגמים השונים לאי-היציבות. מתוצאות אלו ניתן ללמוד כי אכן ישנו קשר הדוק בין הופעת אי היציבות התרמו-מגנטית לבין המוליכות התרמית הכוללת של הדגם, זאת בהתאם לתאוריות המקובלות שעוסקות בנושא. ברור גם שבעת תכנון אפליקציות עתידיות בעזרת מוליכי-על יש לשים דגש על פיזור החום ביישום האפליקטיבי, ולבחור חומרים שיוכלו לפזר את החום היטב ובכך למנוע אי יציבות ופריצות שטף בלתי צפויות. עוד בעניין האפליקטיבי, בשעת התכנון צריך לקחת בחשבון את המבנה הגיאומטרי של היישום האפליקטיבי וזאת בכדי להימנע מצורות גיאומטריות שעשויות לגרום להגברת שדה לוקאלית ובכך לעודד את פריצות השטף הדנדריטיות.

III. "דיאגרמת פאזות" ליציבות דגמי ה-YBCO

באמצעות מדידות שביצענו בדגמי YBCO בעלי מצע YSZ, הצגנו את דיאגרמת הפאזה ליציבות התרמו-מגנטית כתלות בקצב עליית השדה המגנטי ובטמפרטורת הדגם. בעבודה תאורטית שהציגו ארונסון ושות' אשר עסקה בנושא החדירה של מפולות השטף הדנדריטיות אל פילמים דקים מוליכי על, הציגו החוקרים צפי לקצב עליית השדה הקריטי, \dot{B}_c , מעליו מוליכי העל יציגו תצורות חדירת שטף דנדריטיות כתלות בזרם הקריטי של הדגם; הזרם הקריטי הנ"ל תלוי, כמובן, בטמפרטורת הדגם. בחינה של התוצאות שקבלנו אל מול התחזית שהציגה העבודה התיאורטית של ארונסון הראתה התאמה איכותית.

IV. חדירת השטף הדנדריטי משאירה נזקים בלתי הפיכים בדגמי ה-YBCO

התוצאות הראו כי לאחר התרחשות של פריצות דנדריטיות בדגם נוצר נזק באזור הערוץ הראשי ממנו השטף פורץ. תנועת השטף המרבית באזור הפריצה מביאה לכדי חימום לוקאלי גבוה מאוד, וחימום זה מתיך את החומר באזור ומשאיר אחר תעלה. תוצאות אלו נראו בכלל דגמי ה-YBCO על ארבעת מצעיהם השונים כל עוד התרחשה בהם פריצה של שטף מגנטי. משמעות הדבר היא שהדגמים משתנים ונוצרים בהם דפקטים אשר משפיעים על התנהגותם ועל התנאים הדרושים להופעת אי היציבות התרמו-מגנטית, טמפרטורות הסף וכן השדות המגנטיים הנדרשים לצורך השגת חדירות השטף הדנדריטיות אינם עקבים והם משתנים במהלך המדידות. גם לתוצאות אלו ישנה חשיבות רבה בעת תכנון של יישומים אפליקטיביים בעזרת חומרים על מוליכי מכיוון שלא רק שפריצות השטף המגנטי עשויות להפריע לתפקוד הבסיסי של היישום אלא הן אף עשויות להביא לנזקים שיהרסו אותו כליל.

V. שינויים בתצורות השטף הדנדריטי כתלות בטמפרטורת הדגם

הדגמים שנמדדו הראו תלות בין טמפרטורת הדגם לבין תצורות חדירת השטף הדנדריטי בדגם. התוצאות הראו כי עם עליית הטמפרטורה נראתה ירידה עקבית במספר מקורות הפריצה, זאת בעקבות העלייה שחלה בקיבול החום בדגם. בנוסף נמצא כי בטמפרטורות

הקרובות לטמפרטורת הסף, שמעליה הדגם חוזר להציג את חדירת השטף הקלאסית, השטף ההומוגני בעל חזית הגל האחידה חודר ומכסה שטחים נרחבים יותר בדגם ובכך מונע ככל הנראה את התפתחות הדנדריטים ומגביל אותם למספר ענפים מצומצם מאוד, זאת במקביל להתרחבותו של כל ענף באופן אינדיבידואלי. המניע שעומד מאחורי חדירת השטף ההומוגני העמוקה יותר והתרחבות ענפי הדנדריטים הינו ההיחלשות באנרגיית הלכידה של הפלקסונים בדגם בעקבות עליית הטמפרטורה.

VI. זמן החיים להתפתחות הדנדריט בדגם מרגע הפריצה ואילך

המערכת הניסיונית החדשה מאפשרת מדידה דינאמית מהירה מאוד של התפתחות השטף המגנטי בדגם. מגבלת המערכת שלנו נעה סביב חלון זמן של $15 \mu\text{s}$, כאשר מדידה של דינאמיקה מגנטית המהירה מחלון הזמן הנ"ל לא תתאפשר. למרות היכולות המהירות של המערכת לא התאפשרו מדידות המציגות את התפתחות הדנדריטים, דהיינו משך הזמן להתפתחות הדנדריטי הוא מהיר יותר מ $15 \mu\text{s}$ ואנו יכולים רק להצביע על משך זמן זה כחסם העליון לזמן ההתפתחות של דנדריט. תוצאות אלו עומדות בהתאמה לתוצאות עבר בהן נמדדו מהירויות ההתקדמות של הדנדריטים.

לסיכום, תופעת אי היציבות התרמו-מגנטית נצפתה לראשונה ב-HTS מסוג YBCO באמצעות עליית שדה מגנטי חיצוני בלבד. נחקרו ונבדקו התנאים הנדרשים להתרחשות התופעה וכן השפעותיהם של מצעי דגמי ה-YBCO על יציבותם. כמו כן נראו גם השלכות בדמות נזקים בלתי הפיכים שקורים בדגמים בעקבות הפריצות הדנדריטיות, ונבדקו גם השפעת טמפרטורת הדגם על אופי החדירה, ומשך הזמן להתפתחות פריצת השטף הדנדריטי. התוצאות שהתקבלו במחקר חייבות להילקח בחשבון בכל תכנון עתידי המיישם שימוש במוליכי על לצרכים אפליקטיביים.

- [1] M. Baziljevich, A. V. Bobyl, D. V. Shantsev, E. Altshuler, T. H. Johansen, and S. I. Lee, *Physica C: Superconductivity* **369**, 93 (2002).
- [2] T. H. Johansen *et al.*, *EPL (Europhysics Letters)* **59**, 599 (2002).
- [3] A. V. Bobyl, D. V. Shantsev, T. H. Johansen, W. N. Kang, H. J. Kim, E. M. Choi, and S. I. Lee, *Applied Physics Letters* **80**, 4588 (2002).
- [4] J. Albrecht, A. T. Matveev, M. Djupmyr, G. Schütz, B. Stuhlhofer, and H.-U. Habermeier, *Applied Physics Letters* **87** (2005).
- [5] I. A. Rudnev, S. V. Antonenko, D. V. Shantsev, T. H. Johansen, and A. E. Primenko, *Cryogenics* **43**, 663 (2003).
- [6] C. A. Durán, P. L. Gammel, R. E. Miller, and D. J. Bishop, *Physical Review B* **52**, 75 (1995).
- [7] E. Altshuler *et al.*, *Physical Review B* **70**, 140505 (2004).
- [8] I. A. Rudnev, D. V. Shantsev, T. H. Johansen, and A. E. Primenko, *Applied Physics Letters* **87** (2005).
- [9] S. C. Wimbush, B. Holzapfel, and C. Jooss, *Journal of Applied Physics* **96**, 3589 (2004).
- [10] M. Menghini, R. J. Wijngaarden, A. V. Silhanek, S. Raedts, and V. V. Moshchalkov, *Physical Review B* **71**, 104506 (2005).
- [11] P. Leiderer, J. Boneberg, P. Brüll, V. Bujok, and S. Herminghaus, *Physical Review Letters* **71**, 2646 (1993).
- [12] V. Bujok, P. Brüll, J. Boneberg, S. Herminghaus, and P. Leiderer, *Applied Physics Letters* **63**, 412 (1993).
- [13] U. Bolz, B. Biehler, D. Schmidt, B. U. Runge, and P. Leiderer, *EPL (Europhysics Letters)* **64**, 517 (2003).
- [14] I. S. Aranson, A. Gurevich, M. S. Welling, R. J. Wijngaarden, V. K. Vlasko-Vlasov, V. M. Vinokur, and U. Welp, *Physical Review Letters* **94**, 037002 (2005).
- [15] M. Tinkham, *"Introduction to Superconductivity: Second Edition"*, Dover Publications, (2004).
- [16] A. A. Abrikosov, *Soviet Physics - JETP* **5**, 1174 (1957).

- [17] C. P. Bean, *Physical Review Letters* **8**, 250 (1962).
- [18] C. P. Bean and J. D. Livingston, *Physical Review Letters* **12**, 14 (1964).
- [19] R. Surdeanu, R. J. Wijngaarden, E. Visser, J. M. Huijbregtse, J. H. Rector, B. Dam, and R. Griessen, *Physical Review Letters* **83**, 2054 (1999).
- [20] E. Altshuler and T. H. Johansen, *Reviews of Modern Physics* **76**, 471 (2004).
- [21] T. H. Johansen and D. V. Shantsev, "*Magneto-Optical Imaging*", Springer, (2004).
- [22] Å. A. F. Olsen, T. H. Johansen, D. Shantsev, E.-M. Choi, H.-S. Lee, H. J. Kim, and S.-I. Lee, *Physical Review B* **74**, 064506 (2006).
- [23] D. V. Denisov *et al.*, *Physical Review Letters* **97**, 077002 (2006).
- [24] R. G. Mints and A. L. Rakhmanov, *Reviews of Modern Physics* **53**, 551 (1981).
- [25] D. V. Denisov, A. L. Rakhmanov, D. V. Shantsev, Y. M. Galperin, and T. H. Johansen, *Physical Review B* **73**, 014512 (2006).
- [26] E. E. Dvash, I. Shapiro, and B. Y. Shapiro, *Physical Review B* **80**, 134522 (2009).
- [27] J. I. Vestgård, D. V. Shantsev, Y. M. Galperin, and T. H. Johansen, *Physical Review B* **84**, 054537 (2011).
- [28] J. I. Vestgård, D. V. Shantsev, Y. M. Galperin, and T. H. Johansen, *Superconductor Science and Technology* **26**, 055012 (2013).
- [29] V. V. Yurchenko, D. V. Shantsev, T. H. Johansen, M. R. Nevala, I. J. Maasilta, K. Senapati, and R. C. Budhani, *Physical Review B* **76**, 092504 (2007).
- [30] G. C. Lichtenberg, *Novi Comm. Soc. Reg. Sci. Gott.* **8**, 168 (1777).
- [31] T. Schmidhauser and A. Azzola, *New England Journal of Medicine* **365**, e49 (2011).
- [32] M. R. Koblischka and R. J. Wijngaarden, *Superconductor Science and Technology* **8**, 199 (1995).
- [33] L. A. Dorosinskii, M. V. Indenbom, V. I. Nikitenko, Y. A. Ossip'yan, A. A. Polyanskii, and V. K. Vlasko-Vlasov, *Physica C: Superconductivity* **203**, 149 (1992).
- [34] A. A. Polyanskii, X. Y. Cai, D. M. Feldmann, and D. C. Larbalestier, in *Nano-Crystalline and Thin Film Magnetic Oxides*, edited by I. Nedkov, and M. Ausloos (Springer Netherlands, 1999), pp. 353.

- [35] G. Pål Erik, H. Harald, B. Michael, I. y. Eugene, L. G. Peter, and H. J. Tom, *Superconductor Science and Technology* **14**, 729 (2001).
- [36] D. Giller, A. Shaulov, T. Tamegai, and Y. Yeshurun, *Physical Review Letters* **84**, 3698 (2000).
- [37] D. Giller, B. Kalisky, A. Shaulov, T. Tamegai, and Y. Yeshurun, *Journal of Applied Physics* **89**, 7481 (2001).
- [38] D. Giller, B. Y. Shapiro, I. Shapiro, A. Shaulov, and Y. Yeshurun, *Physical Review B* **63**, 220502 (2001).
- [39] B. Kalisky, D. Giller, A. Shaulov, and Y. Yeshurun, *Physical Review B* **67**, 140508 (2003).
- [40] B. Kalisky, A. Shaulov, T. Tamegai, and Y. Yeshurun, *Journal of Applied Physics* **93**, 8659 (2003).
- [41] B. Kalisky, A. Shaulov, and Y. Yeshurun, *Physical Review B* **68**, 012502 (2003).
- [42] B. Kalisky, Y. Bruckental, A. Shaulov, and Y. Yeshurun, *Physical Review B* **68**, 224515 (2003).
- [43] B. Kalisky, D. Giller, A. Shaulov, T. Tamegai, and Y. Yeshurun, *Physical Review B* **72**, 014531 (2005).
- [44] B. Kalisky, Y. Myasoedov, A. Shaulov, T. Tamegai, E. Zeldov, and Y. Yeshurun, *Physical Review Letters* **98**, 107001 (2007).
- [45] B. Kalisky, A. Shaulov, Y. Myasoedov, E. Zeldov, T. Tamegai, and Y. Yeshurun, *Physica C: Superconductivity* **460–462, Part 2**, 1210 (2007).
- [46] D. Barness, "*Flux Instabilities in Partially Irradiated $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Crystals*", Bar Ilan University, Ramat Gan, Israel, Ph. D. (2009).
- [47] M. Baziljevich, T. H. Johansen, H. Bratsberg, Y. Shen, and P. Vase, *Applied Physics Letters* **69**, 3590 (1996).
- [48] C. J. van der Beek, S. Colson, M. V. Indenbom, and M. Konczykowski, *Physical Review Letters* **84**, 4196 (2000).
- [49] N. Avraham, E. H. Brandt, G. P. Mikitik, Y. Myasoedov, M. Rappaport, E. Zeldov, C. J. van der Beek, M. Konczykowski, and T. Tamegai, *Physical Review B* **77**, 214525 (2008).
- [50] M. Baziljevich, D. Barness, M. Sinvani, E. Perel, A. Shaulov, and Y. Yeshurun, *Review of Scientific Instruments* **83** (2012).
- [51] B. Utz, R. Semerad, M. Bauer, W. Prusseit, P. Berberich, and H. Kinder, *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* **7**, 1272 (1997).

- [52] R. G. Mints and E. H. Brandt, *Physical Review B* **54**, 12421 (1996).
- [53] A. Gurevich, *Applied Physics Letters* **78**, 1891 (2001).
- [54] M. Friesen and A. Gurevich, *Physical Review B* **63**, 064521 (2001).
- [55] P. Vase, Y. Q. Shen, and T. Freltoft, *Physica C: Superconductivity* **180**, 90 (1991).
- [56] P. Brüll, D. Kirchgässner, and P. Leiderer, *Physica C: Superconductivity* **182**, 339 (1991).
- [57] H.-S. Yang, G. R. Bai, L. J. Thompson, and J. A. Eastman, *Acta Materialia* **50**, 2309 (2002).
- [58] Y. Suemune, *Journal of the Physical Society of Japan* **20**, 174 (1965).
- [59] G. A. Slack, *Physical Review* **126**, 427 (1962).
- [60] T. Kaiser, University of Wuppertal, Wuppertal, Ph. D. (1998).
- [61] J. I. Vestgård, D. V. Shantsev, Y. M. Galperin, and T. H. Johansen, *Sci. Rep.* **2** (2012).
- [62] P. Brüll, D. Kirchgässner, P. Leiderer, P. Berberich, and H. Kinder, *Annalen der Physik* **504**, 243 (1992).
- [63] J. Bardeen and M. J. Stephen, *Physical Review* **140**, A1197 (1965).
- [64] D. Pavuna, "*Introduction to Superconductivity and High-Tc Materials*", World Scientific, (1992).
- [65] H. Darhmaoui and J. Jung, *Physical Review B* **53**, 14621 (1996).
- [66] J. Aponte, H. C. Abache, A. Sa-Neto, and M. Octavio, *Physical Review B* **39**, 2233 (1989).
- [67] M. Ohmukai, T. Fujita, and T. Ohno, *Brazilian Journal of Physics* **31**, 511 (2001).
- [68] M. Baziljevich, T. H. Johansen, H. Bratsberg, Y. Galperin, P. E. Lindelof, Y. Shen, and P. Vase, *Physica C: Superconductivity* **266**, 127 (1996).



Bar-Ilan University

Dendritic flux patterns in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films

Elran Baruch-El

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



Bar-Ilan University

Dendritic flux patterns in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films

Elran Baruch-El

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

This work was carried out under the supervision of Prof. Yosef Yeshurun, Institute of Superconductivity and Institute of Nanotechnology, Department of physics, Bar-Ilan University.

ABSTRACT

When an applied magnetic field penetrates a superconductor above H_{c1} it usually produces a uniform flux front. However, recent magneto-optical imaging (MOI) experiments have shown that the flux front in superconducting films may become thermo-magnetically unstable, exhibiting nonuniform, dendritic flux patterns. Such patterns were observed in 'conventional' superconductors such as MgB_2 , Nb_3Sn , Nb , NbN , YNi_2B_2C , and Pb , after exposing the films to an external magnetic field exceeding a temperature dependent threshold field. The phenomenon reflects a thermomagnetic breakdown of the superconductor occurring when a fluctuation weakens the pinning of some vortices, causing them to move and locally heat the material, thus reducing the pinning even further, promoting motion of more vortices. Such a runaway scenario is expected in all superconductors and yet, unlike conventional superconductors, high-temperatures superconductors (HTS) did not show dendritic flux patterns during field ramp, even at high fields. In an effort to generate dendritic patterns in a HTS material, Leiderer *et al.* exploited a laser to locally warm up $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) films to above the superconducting critical temperature causing dendritic avalanches to burst out from the heated area. Nevertheless, even though numerous efforts as been made by these and other researchers, a thermomagnetic instability has never been observed in YBCO films exposed only to a magnetic field, namely in experiments similar to those generating dendritic patterns in conventional superconductors.

In this work we report on the first systematic investigation of thermomagnetic dendritic avalanches in YBCO films exposed to a magnetic field only. Unlike previous experiments, in our work the magnetic field is ramped up very rapidly exploiting a unique, recently built, ultra-fast magneto-optical system acquiring up to 68,000 images per second. This system includes a specially designed magnet that can

be ramped up at a rate of 3 kT/s. Dendritic flux formation triggered just by rapid ramping of the external field is reported here for the first time in YBCO on yttrium stabilized zirconia (YSZ). The ability to routinely generate dendritic avalanches allows the study of the conditions which allow the thermomagnetic instability, in particular the threshold temperatures and ramp rates for the appearance of the dendrites. We found that the dependence of the threshold ramp rate on the temperature, $\dot{B}_{th}(T)$, increases with temperature, demonstrating a qualitative agreement with theoretical predictions.

We also investigated dendritic flux formations in YBCO films grown on three other substrates: SrTiO₃, MgO and Sapphire. These films, however, showed dendritic patterns only after introducing an artificial damage perpendicular to the film edge, a defect that enhanced the local induction. The difference in thermomagnetic stability of the four films is shown to correlate with the thermal conductivity of the substrate, one of the main material parameters that are involved in the heat diffusion.

The nature of the dendritic formation is found to change with temperature. In particular, the number of dendrites and the number of branches in each individual dendrite decrease as temperature increases. The length and width of the dendritic branches increase with temperature, probably due to the faster flux relaxation at higher temperatures. In addition, we found an upper limit of $\sim 15 \mu\text{s}$ for the time development of the dendrites in our YBCO samples.

Another important finding of our work is the permanent damage caused by the instability; the avalanches in YBCO often leave an imprint of their path, in the form of a channel of melted material, making a permanent damage to the superconducting films. Moreover, our work demonstrates that narrow slits and patterned field-focusing shapes promote dendritic avalanches and consequently more damages. Such damages were not observed in conventional superconductors, even those who routinely show the dendritic instability. Their cause in YBCO is probably due to the heat generated by flux avalanches resulting from the fast field ramp together with the relatively slow heat diffusion.

Our results demonstrate the generic character of dendritic flux avalanches in films of type-II superconductors, indicating that the phenomenon is not limited to

conventional superconductors. The results are also important to application of HTS superconducting films as stability and predictability of the behavior in the presence of field is, of course, a crucial aspect for applications. The observed damages add uncertainty to the use of HTS films in future devices. Therefore, the results of this work and its conclusions should be taken into account in designing superconducting films for future applications.