

**מדידת המקדם הקבוע של סליל וחישוב זמן הרלקסציה של DPPH במערכת ESR**

שם: נתיב מאור | ת"ז: 319002911 | דוא"ל: [nativ.maor@campus.technion.ac.il](mailto:nativ.maor@campus.technion.ac.il)

שם: דור חי שחם | ת"ז: 318258555 | דוא"ל: [dor-hay.sha@campus.technion.ac.il](mailto:dor-hay.sha@campus.technion.ac.il)

May 6, 2023

## תקציר

ניסוי זה מורכב משני חלקים שהתבצעו על אותה מערכת עד כדי שינויים קלים. בשני החלקים, בתוך סליל חיצוני הוצב סליל פנימי ניצב לו שבתוכו הוצב דגם פחמימן מוצק -  $DPPH$ . שדה מגנטי שנוצר עקב הזרמת זרם בסליל החיצוני גורם להפרדה של רמות האנרגיה של האלקטרונים ב- $DPPH$ . כאשר קרינה מהסליל הפנימי בתדר מתאים לרמות של מצב התהודה (הנקבעות על ידי השדה הנוצר מהסליל החיצוני) פוגעת בדגם, משתנה הסוספטביליות המגנטית שלו וכך גם ההשראות וההתנגדות האפקטיבית של הסליל. הסליל הפנימי היה מחובר למעגל תהודה עם משוב חיובי של המחולל. האות המתקבל ביציאה מהמחולל פרופורציונאלי להספק של הבליעה בדגם וכך ניתן לזהות מצב של תהודה במערכת.

בניסוי הראשון, בעזרת זיהוי תכונות מצב התהודה בתנאים שונים חושב המקדם  $k$  בקשר  $H = kI$  בשלוש דרכים שונות, קבלנו התאמה חלקית בין התוצאות של המדידות השונות. כמו כן בהשוואה של תוצאות המדידה עם ערך שחושב ממדידות המערכת קבלנו הכלה של הערך רק עבור אחת מהדרכים. בניסוי השני, בעזרת מדידות אות התהודה כתלות בזרם הישר בסליל החיצוני נמדדה נגזרת אות הבליעה לפי הזרם, ממנה שוחזר אות הבליעה כתלות בזרם, וממנו חושב מקדם הרלקסציה  $T_2$  של דגם  $DPPH$ . קיבלנו תוצאות שעומדות בקנה אחד עם התיאוריה והערכים המקובלים בספרות.

## מבוא

מערכת הניסוי תוארה בקצרה בתקציר, בחלק זה נרחיב על המודל התיאורטי אודותיה.

לחלקיקים בעלי ספין כגון אלקטרונים יש מומנט מגנטי, לכן בעת צימוד לשדה מגנט האנרגיה במצבים השונים נקבעת לפי

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = g\mu_B m_s B$$

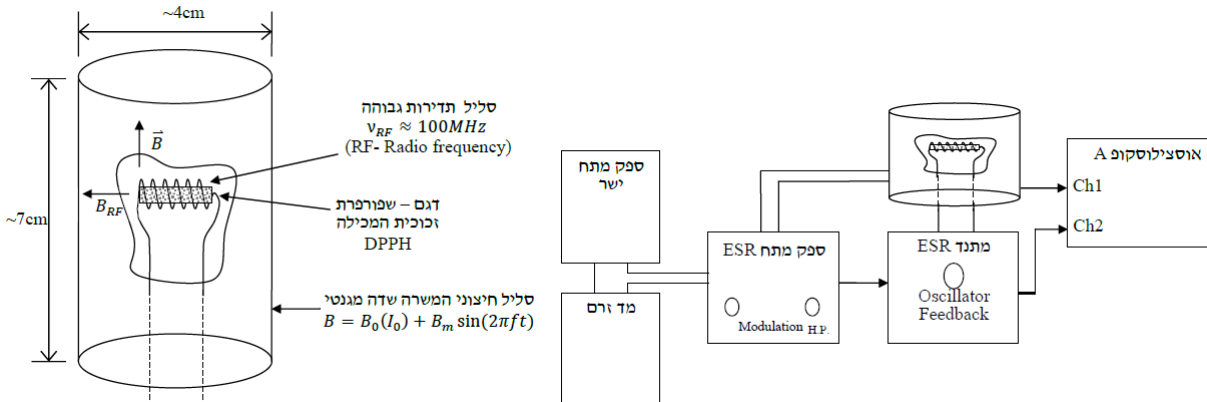
כש  $g$  קבוע הפיצול,  $\mu_B = 0.927 \cdot 10^{-23} [\frac{J}{T}]$  הוא המגנטון של בורר,  $m_s$  הוא ערך הספין שעבור אלקטרונים  $m_s \in \{-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\}$

ו  $B$  הוא השדה המגנטי ביחידות  $[T]$ . ולכן ההפרש בין האנרגיות של שני המצבים הוא  $\Delta U = g\mu_B B$

בניסויים השתמשנו בדגם  $DPPH$ , לו יש רדיקלים חופשיים כלומר מכיל אלקטרונים בלתי מזווגים ולהם צימוד חלש לסריג

האטומי ולכן ערך  $g$  שלהם בו נשתמש בניסוי הוא  $g(DPPH) = 2.0036 \pm 0.0002$  בדומה לזה של אלקטרונים חופשיים.

הדגם הוצב בתוך שני סלילים, סליל חיצוני המכיל סליל פנימי, שניהם ניצבים אחד לשני, כפי שמוצג באיור 1:



### איור 1-2:

איור 1 - תרשים מערכת הסלילים בניסוי (איור 1 בתדריך)

איור 2 - תרשים מערכת הניסוי (איור 3 בתדריך), הסליל החיצוני, הפנימי והדגם מתוארים על ידי הגליל שמעל המלבן

המציג את מתנד ה-ESR.

השדה החיצוני  $\vec{B}$  נוצר על ידי הסליל החיצוני ויוצר הפרדה של רמות האנרגיה לפי משוואה (1). כאשר קרינה אלקטרומגנטית

מ  $B_{RF}$ , הנוצרת מזרם בסליל הפנימי, פוגעת בדגם בתדר המתאים לערור של אלקטרונים מהרמה התחתונה לעליונה היא

מעררת אלקטרונים מהרמה התחתונה ובכך גורמת לבליעה של אנרגיה בדגם. התדר המתאים לשדה מהסליל החיצוני נתון

לפי נוסחא 3:

(1)

$$\frac{h\nu_{RF}}{g\mu_B} = B_{res}$$

כש  $B_{res}$  הוא השדה המגנטי החיצוני,  $h = 6.624 \cdot 10^{-34} J \cdot s$  קבוע פלאנק ו  $\nu_{RF}$  היא תדירות הגל המתאימה לרזוננס<sup>4</sup> עבור השדה המגנטי.

כש  $R$  היא התנגדות הסליל ב[ohm],  $I$  הזרם ב[A] ו  $V$  המתח ב[Volt].  
הזרם קשור לשדה המגנטי לפי:

$$(2) \quad \frac{B}{\mu_0} = kI$$

כש  $k$  הוא פקטור גיאומטרי הנובע ממידות הסליל ביחידות  $[1/m]$ . במהלך החלק הראשון של הניסוי נמדוד את  $k$  ב3 דרכים.

מערכת הניסוי בשני חלקיה מתוארים באיור 2.

הסליל הפנימי חובר למתנד  $ESR$  בתדירות קבועה שמתאזנת על ידי משוב חיובי של המחולל. כשהסליל הפנימי מתפקד כמשרן עם השראות שמשתנה בעת הגעת הדגם לרזוננס עקב שינוי הסוספטביליות של הדגם. עקב המשוב החיובי מדידת מתח על המתנד בערוץ 2 היא פרופורציונלית להספק הבליעה המתרחש בדגם. על ידי אות מערוץ זה אנו מזהים את תופעת הרזוננס בניסויים השונים.

הזרם העובר דרך הסליל החיצוני הוא זרם משתנה היוצר שדה משתנה:

$$(3) \quad B = \mu_0 k (I_0 + I_m \sin(2\pi ft))$$

כש  $f$  היא תדירות ב[Hz] ו  $I_{m/0}$  הם אמפליטודות הזרמים ב [A].

על ידי שינוי של אמפליטודות הזרמים, עקב הקשר שלהם לשדה המגנטי והקשר של השדה המגנטי לתדירות הרזוננס, משתנה גם תבנית אות הבליעה. בחלק הראשון של הניסוי זיהינו את הזרמים המתאימים לתבנית אות בליעה איכותית רצויה ומהן הסקנו את  $k$  ב3 דרכים שונות. בחלק הזה  $I_m$  נקבע על ידי מודולציה דרך ספק ה- $ESR$ .  
השונו את הערכים לערך תיאורטי שחושב מהגאומטריה של המערכת לפי

$$(4) \quad k = \frac{N}{2L} (\cos(\alpha) + \cos(\beta))$$

כאשר  $N$  מספר הליפופים 440,  $L$  אורך הסליל 70mm,  $\alpha, \beta$  הזוויות בין קצוות הסליל למיקום המערכת. הקוטר החיצוני 43mm והפנימי 38mm.

בחלק השני של הניסוי,  $I_m$  נשלט על ידי המחולל של האוסצילוסקופ. אז, על ידי שליטה בגודל חלון המדידה כך שהקשר ביץ אות הזרם לאות הבליעה יהיה בקירוב טוב לינארי, נמדדה הנגזרת של תבנית הבליעה כתלות בזרם ושוחזרה ממנה תבנית הבליעה על ידי אנטגרציה נומרית שעל פי התיאוריה צריכה לקיים את הקשר הבא:

$$(5) \quad V_{absorb} \propto \frac{\omega_0 \cdot \omega \cdot T_2}{1 + (\omega_0 - \omega)^2 \cdot T_2^2}$$

כש  $T_2$  הוא זמן הרלקסציה ב[sec],  $\omega_0 = \frac{B \cdot g \cdot \mu_B}{\hbar}$  תדירות הפרסציה החופשית,  $\omega = \nu_{RF} \cdot 2\pi$  תדירות המתנד. בוצעה רגרסיה של הנתונים למשוואה 6 על מנת לקבל את  $T_2$ .

## תוצאות הניסוי

### חלק ראשון

#### מדידה 1

לשם חישוב הזרמים הזורמים בסליל בהמשך הניסוי, מדדנו את התנגדות הנגד המחובר בטור אל הסליל. על ידי הפעלת מתח על הנגד ומדידת הזרם קיבלנו בעזרת חוק אוהם שהתנגדות הנגד היא

$$r = 0.827 \pm 0.0012\Omega$$

השגיאה (וכל שאר השגיאות) חושבו לפי הנוסחא לחישוב שגיאות נגררות בנספח.

ערך זה בחפיפה עם הערך הנתון בתדריך שהוא  $0.82 \pm 0.004\Omega$ .

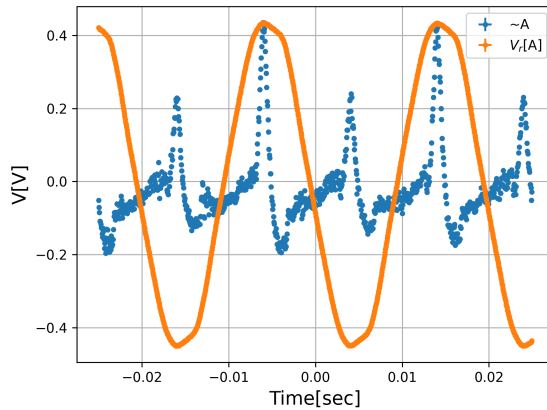
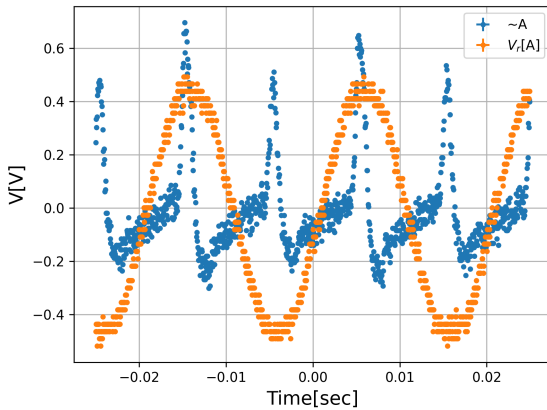
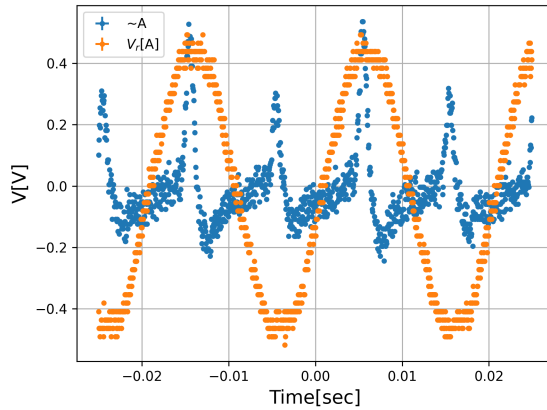
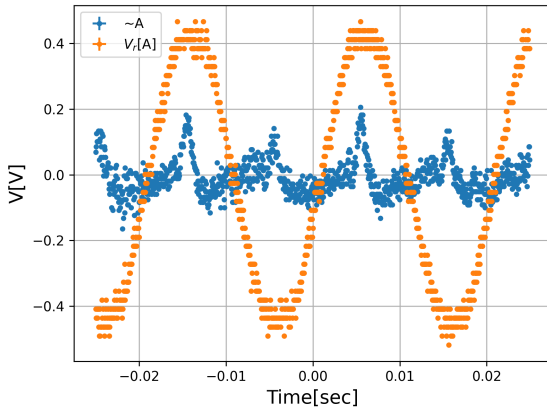
לאחר מכן חיברנו את מערכת הניסוי והפעלנו את המודולציה כשהיא מכוונת למקסימום. שינינו את קיבול הקבל במערכת ה-*feedback* בשביל לקבל בליעה מקסימלית. מתוך הערכים הנתונים על החוגה והערך שבחרנו חילצנו בעזרת אקסטרפולציה לינארית את תדר הסליל הקטן

$$\nu_{RF} = 95.58 \pm 0.09MHz$$

מתוך נוסחא 1 חישבנו את עוצמת השדה המגנטי שיצור תהודה בתדר זה

$$B_{res} = 3.4107 \pm 0.0033mT$$

בשלב זה שינינו את ערך המודלציה ומצאנו את הערך הגבולי בו מתחילה הבליעה אלו הגרפים שהתקבלו:



**גרף 1-4 (כאשר המספור משמאל לימין ומלמעלה למטה):** אות הבליעה, המתח על הנגד שבטור לסליל כפונקציה של הזמן.

ציר ה- $x$  זמנים בשניות וציר ה- $y$  מייצג מתחים בוולט.

הנקודות הכחולות הן מדידות המתח של אות הבליעה  $\sim A$  (ולכן פרפורציוני לבליעה), הכתומות המתח על הנגד שנמצא בטור לסליל  $V_r$  ופרפורציוני למודלציה.

4 הגרפים מציגים את המתחים עבור מודלציות שונות מן ההקטן לגדול כשבגרף 1 רואים את התחלת תופעת הבליעה ובגרף 3 היא מקסימלית. בגדלה נוספת בגרף 4 של המודלציה ניתן לראות שאות הבליעה קטן.

קווי השגיאה קטנים מכדי לראותם בגרף.

גרפים אלו מתאימים איכותית לתאוריה כאשר המודלציה היא גבולית בשביל לקבל בליעה יתקבלו בליעות רק כאשר מתח המודלציה אקסטרמימלי.

מתוך גרף 3 אשר מהווה את הרגע בו הבליעה מקסימלית נחלץ את הזרם המקסימלי בסליל בעזרת ערך הנגד שמדדנו. בעזרת נתונים אלו על פי נוסחא 2 נקבל

$$k_1 = \frac{H}{I} = \frac{B_{res}/\mu_0}{I} = 4438 \pm 8 \frac{1}{m}$$

משום שהתופעה נמדדה בצורה איכותית (ייתכן שבחרנו מודלוציה נמוכה או גבוהה מדי) חישבנו מחדש את השגיאה בתור הפרש מתחים עבור המחמיר מבין המדידה עם המודלוציה המינמלית (כאשר תופעת הבליעה מתחילה) לבין המדידה שנלקחה או המקסימלית (כאשר תופעת הבליעה מסתיימת) וקיבלנו

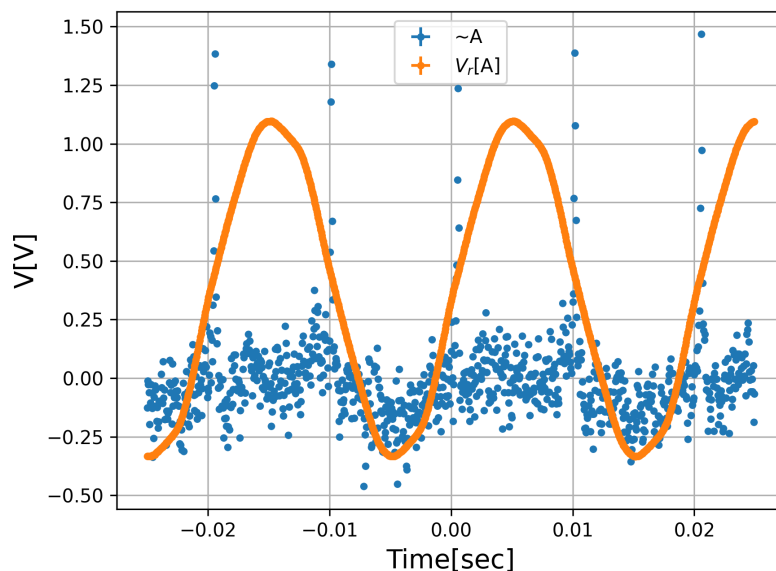
$$k_1 = 4400 \pm 400 \frac{1}{m}$$

## מדידה 2

לאחר מכן, ביצענו מדידה נוספת של  $k$  בעזרת הוספת זרם ישר. חיברנו את המעגל בטור לספק מתח ישר והעלנו באיטיות את מתח הספק עד שזיהינו איכותית שמתקיימים הקריטריונים הבאים: מרחק שווה בין השיאים, המרחק בלתי תלוי במתח על הסליל החיצוני ושהשיאים מתקבלים בנקודת ההתאפסות של המודלוציה. עבור הזרם

$$I = 0.5241 \pm 0.0001 A$$

התקבל הגרף:





**גרף 5:** אות הבליעה, המתח על הנגד שבטור לסליל כפונקציה של הזמן.

ציר ה- $x$  זמנים בשניות וציר ה- $y$  מייצג מתחים בוולט.

הנקודות הכחולות הן מדידות המתח של אות הבליעה  $A \sim$  (ולכן פרפורציוני לבליעה), הכתומות המתח על הנגד שנמצא בטור לסליל  $V_r$  ופרפורציוני למודלציה + המתח הישר.

קווי השגיאה קטנים מכדי לראותם בגרף.

ניתן לראות שהקריטריונים מתקיימת מבחינה איכותית בקירוב.

על פי נוסחא 2 נקבל

$$k_2 = 5178 \pm 5 \frac{1}{m}$$

משום שהקריטריון האיכותי היה קשה לזיהוי חזרנו על מדידה זו פעמיים נוספות וקיבלנו את הערכים

$$k'_2 = 5694 \pm 6 \frac{1}{m}, k''_2 = 5301 \pm 6 \frac{1}{m}$$

באופן דומה לסעיף קודם בשביל לכתוב באופן כמותי את השגיאה של הזיהוי האיכותי לקחנו כשגיאה על הזרם את ההפרש בין הזרם שנמדד בין שתי המדידות שמקיימות את הקריטריונים עם הפרש הזרמים הגדול (המחמיר) וקיבלנו

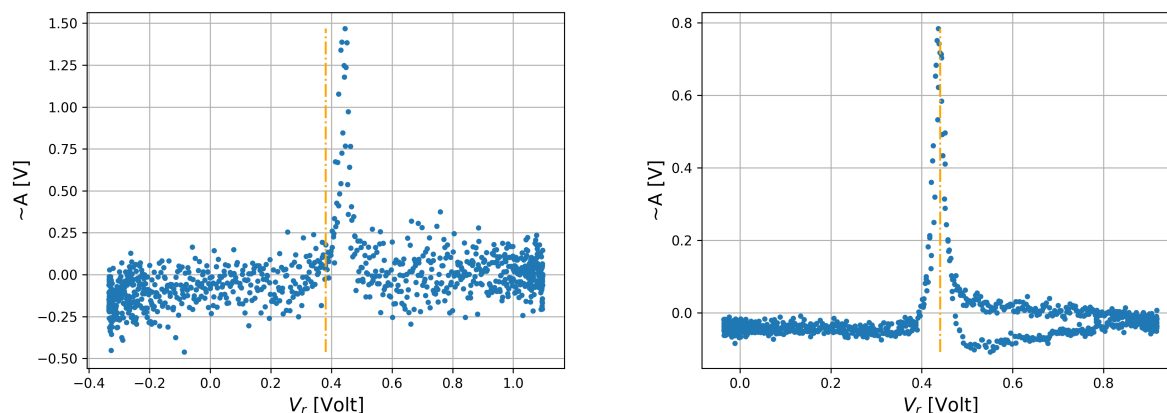
$$k_2 = 5200 \pm 500 \frac{1}{m}$$

### מדידה 3

בשלב זה העברנו את הסקופ למצב  $XY$  ושינינו את הזרם הישר  $I_0$  כך שתתקבל תמונה סימטרית בציר  $x$ . עבור הזרם

$$I_0 = 0.5513 \pm 0.0001 A$$

התקבל הגרף הבא (לשם השוואה נצרף גם את הגרף המתאים עבור מדידה 2):



**גרף 6-7 (משמאל לימין):** אות הבליעה כפונקציה של המתח על הנגד שבטור לסליל.

גרף 6 - מייצג את מדידה 2 וגרף 7 - מייצג את מדידה 3.

ציר ה- $x$  זמנים בוולט וציר ה- $y$  מייצג מתחים בוולט.

הנקודות הכחולות הן מדידות המתח של אות הבליעה  $\sim A$  (ולכן פרפורציוני לבליעה), הקו הכתום מייצג את המרכז בין המדידה הכי שמאלית להכי ימנית.

ניתן לראות באופן איכותי שגרף 7 (של מדידה 3) אכן סימטרי ביחס לקצוות הגרף. כמו כן ניתן לראות שמדידה 2 אינה סימטרית באופן זה.

מתוך הזרם הנמדד  $I_0$  על פי נוסחא 2 חושב

$$k_3 = 4923 \pm 5 \frac{1}{m}$$

## חלק שני

חיברנו את המערכת בצורה בה הזרם הזורם בסליל החיצוני הוא סכום הזרמים של המודלציה וספק הזרם הישר. הדלקנו את המערכת ובחרנו קיבול במערכת ה- $feedback$  כך שיראו בירור קווי בליעה, בדומה לחלק הראשון ביצענו אקסטרפולציה לינארית וקיבלנו

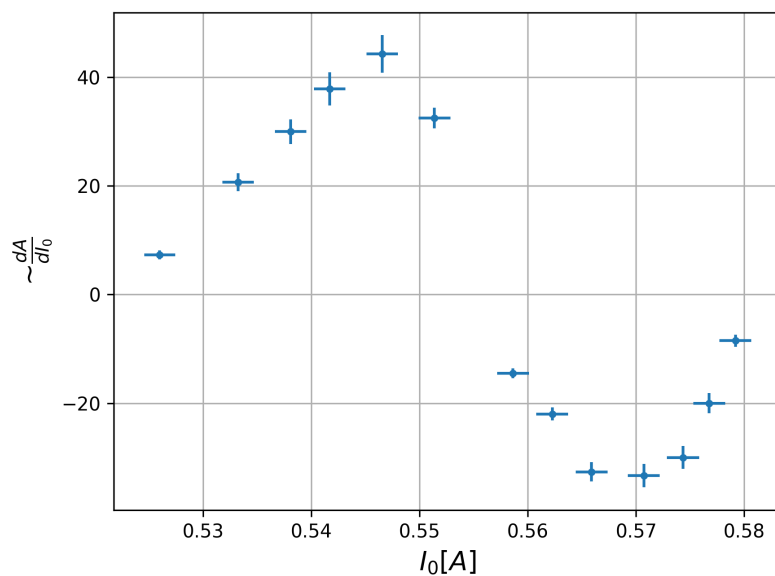
$$v_{RF} = (9.583 \pm 0.008) \cdot 10^7 Hz$$

התדירות הזווית המתאימה לגודל זה היא

$$\omega = (6.021 \pm 0.005) \cdot 10^8 \frac{rad}{sec}$$

העברנו את הסקופ להצגת  $XY$  ובחרנו זרם ישר  $I_0$  כך שהתמונה תהיה סימטרית (באופן זהה למדידה 3 בחלק הראשון). בשלב זה כיבינו את המודלציה והפעלנו את מייצר הגלים של הסקופ על תדירות  $1kHz$  ומשרעת מקסימלית, שינינו באיטיות את הזרם  $I_0$  בשביל לזהות את התחום שלו שבו מתקיימת בליעה. לשם מדידת הנגזרת של אות הבליעה הקטנו את משרעת מכולל הגלים כך שבכל התחום האות בסקופ יהיה פונקציה לינארית.

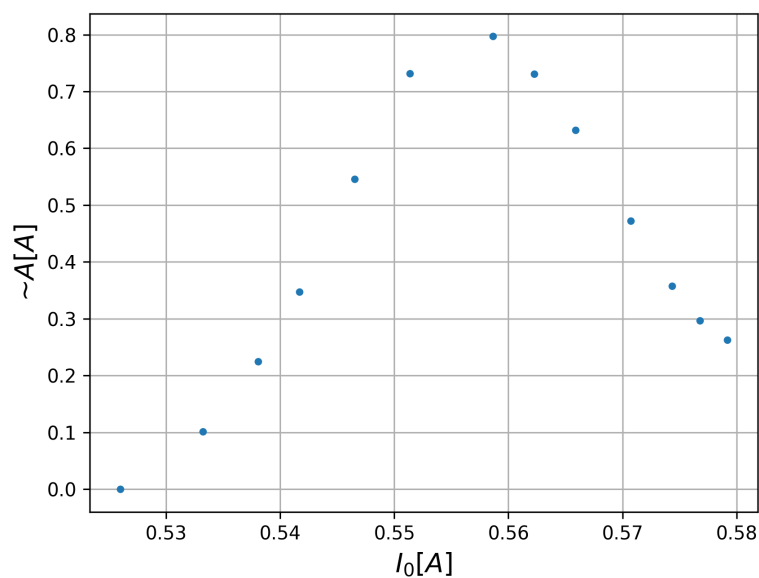
עברנו על כל התחום של  $I_0$  בו מתקיימת בליעה ומדדנו את מתח מכולל הגלים ומתח הבליעה והפאזה ביניהם. בעזרת גדלים אלו קיבלנו קירוב לנגזרת של אות הבליעה ביחס לזרם הישר, התקבל הגרף הבא:



**גרף 8:** נגזרת אות הבליעה לפי הזרם הישר  $I_0$

ציר ה- $x$  הוא הזרם הישר באמפר וציר ה- $y$  מייצג את הנגזרת של אות הבליעה (חושב כיחס בין מתחים ולכן חסדר יחידות).

בשלב זה ביצענו אינטגרציה נומרית על הנגזרת בשביל לקבל את אות הבליעה כפונקציה של הזרם הישר, התקבל הגרף הבא:<sup>12</sup>

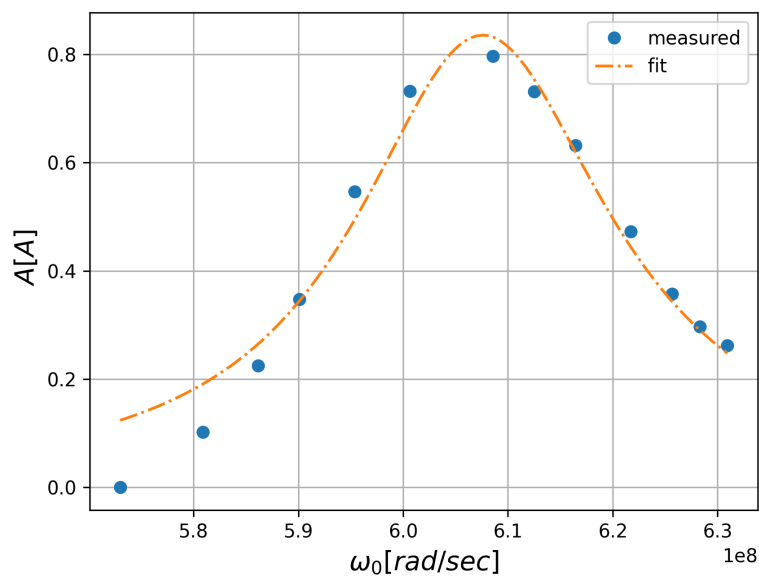


גרף 9: אות הבליעה לפי הזרם הישר  $I_0$

ציר ה- $x$  הוא הזרם הישר באמפר וציר ה- $y$  הוא אות הבליעה (היות ובוצעה אינטגרציה על הזרם היחידות כעת הם באמפר).

לגרף זה עשינו המרה מ- $\omega_0 \rightarrow I_0$  לפי נוסחא 1 ועשינו התאמה לפונקציה הפרופוזיטיונית לאות הבליעה לפי נוסחא 5.

התקבלה ההתאמה הבאה:



**גרף 9:** אות הבליעה לפי התדירות הזוויתית  $\omega_0$

ציר ה- $x$  את התדירות הזוויתית  $\omega_0$  ברדיאן לשנייה וה- $y$  הוא אות הבליעה.

הנקודות הכחולות מייצגות את הערך שחושב באינטגרציה ואילו הקו הכתום הוא הפונקציה שהותאמה.

ניתן לראות איכותית שההתאמה לא רעה אך אינה מוצלחת במיוחד. מבחינה כמותית התקבל  $R^2 = 0.9893$ .

מתוך ההתאמה חולצו המקדמים

$$\omega_{fit} = 6.07415078 \cdot 10^8 \pm 0 \frac{rad}{sec}$$

$$T_2 = 67 \pm 10 ns$$

עבור  $\omega_{fit}$  רשמנו את השגיאה כ-0 משום שהיא קטנה בהרבה בכ-30 סדרי גודל מהערך עצמו.

ניתן לראות ש- $\omega_{fit}$  לא נמצא בטווח השגיאה של הגודל שחושב בהאקסטרפולציה לינארית  $\omega = 6.021 \pm 0.005 \cdot 10^8$  כנראה בעקבות ההתאמה הלא טובה.

בנוסף הערך שחולץ עבור  $T_2$  מכיל את הערך המקובל בספרות [3]  $T_2^{theory} = 62 ns$  אך שווה לציין שטווח השגיאה גדול כנראה עקב אי-התאמה גבוהה.

## דיון בתוצאות

### חלק ראשון

בחלק הראשון של הניסוי, בו מדדנו את  $k$  ב-3 דרכים שונות התקבלו התוצאות הבאות:

במדידה הראשונה, בה חיפשנו את  $k$  דרך חיפוש המודולציה הגבולית שבה מתקבלת תופעת הבליעה ודרכה הערכנו את המתח בו מתרחשת התהודה מצאנו ש  $k_1 = 4400 \pm 400 \frac{1}{m}$ , שגיאה יחסית של כ-9.1%. נציין שההערכה של ערך המודולציה הגבולית הייתה תוך חיפוש אחר תופעה איכותית שקשה להעריכה באופן מדויק והטווח שבו היא מתרחשת איננו מוגדר היטב לכן גם הערכת שגיאת המדידה נתונה לפרשנות. אנו חושדים שהערכת השגיאה שלנו במדידה זו הייתה מקלה מידי (כלומר ייחסנו לשגיאת המדידה טווח קטן משהיינו אמורים). הערכת השגיאה נקבעה לפי התחום של המתחים הממוצעים בהם תופעת הבליעה התרחשה.

במדידה השנייה, בה חיפשנו את  $k$  דרך חיפוש רכיב הזרם הישיר בסליל שעברו מתקבלת בליעה בזמנים שבהם המתח מתאפס. זיהינו את תופעה זו על ידי עמידה ב-3 הקריטריונים שצוינו בחלק הקודם. גם במדידה זו ההערכה של קיום הקריטריונים הייתה איכותית במהותה וראינו אותה עבור ערכים שונים של גודל ישיר שמדדנו, שקללנו את טווח הערכים שהתקבל בהערכת שגיאת המדידה. מצאנו ש  $k_2 = 5200 \pm 500 \frac{1}{m}$ . עם שגיאה יחסית של כ-9.6%.

במדידה השלישית, עברנו להצגת האותות משני ערוצי הסקופ כתלות אחד בשני, בהצגה זו ניתן לזהות את תופעת הבליעה כשהתבנית המתקבלת בגרף  $XY$  היא סמטרית סביב  $x = 0$ . גם כאן התופעה היא איכותית, אך במקרה הזה זיהוי התופעה ברור יותר וטווח הערכים הנמדדים בו היא מתרחשת קטן יחסית (סטייה קטנה מהערך המדוד הורסת את התבנית הסמטרית) לכן הערכת שגיאת המדידה של הגדלים הנמדדים במדידה זו הייתה קטנה יחסית למדידות האחרות. התקבל  $k_3 = 4923 \pm 5 \frac{1}{m}$  עם שגיאה יחסית של 0.1%. שווה לציין, שבהצגה של  $XY$  ניתן לראות שהזרם שהוביל למדידה 3 מוביל לתמונה סימטרית בהרבה מהמדידה של  $k_2$  שבאופן מובהק אינה סימטרית.

כעת נשווה בין תחומי הערכים שהתקבלו מהמדידות השונות.

ניתן לראות שהתחום של  $k_2$  מכיל את התחום של  $k_3$  וחופף במקצת לתחום של  $k_1$ , בתחום  $k_1 \cap k_2 = (4700, 4800) \frac{1}{m}$ . זאת בעוד שהתחומים של  $k_1$  ו  $k_3$  אינם חופפים. יתכן שהערכת שגיאת המדידה של  $k_3$  הייתה קטנה מידי.

כמו כן, חושב הערך תיאורטי של  $k$  לפי מידות הסליל בהנחה שמיקום דגם ה  $DPPH$  הוא בדיוק במרכז הציר של הסליל החיצוני לפי נוסחא 4. הערך התיאורטי שחושב הוא  $k_{theory} = 5440 \frac{1}{m}$  (חושב כסופרפוזיציה של 4 שכבות עם קטרים משתנים בצורה לינארית בין הקוטר הפנימי והחיצוני שכל אחת מהן עם 110 ליפופים). הערך התיאורטי מוכל רק בתחום של  $k_2$ . נראה שישנה התאמה חלקית בין תוצאות מדידת  $k$  השונות, אומנם לא כל התחומים של  $k$  שנמדדו חופפים אחד עם השני אך ישנו תחום (של  $k_2$ ) המכיל את שאר הערכים. אנו מעריכים שהערכת שגיאת המדידה של  $k_1$  ו  $k_3$  לא הייתה נוקשית מספיק.

מתוך אנליזת הנתונים קיבלנו את קבוע הדעיכה

$$T_2 = 67 \pm 10 ns$$

תחום זה מכיל את הערך המקובל בספרות [3]  $T_2^{theory} = 62 ns$ , עם זאת השגיאה היחסית היא כ-15% (חושב לפי נוסחא לחישוב שגיאות יחסיות בנספח) ולכן הטווח די גדול אשר מעיד על דיוק נמוך. כמו כן, קריטריון נוסף לבדיקת ההתאמה הוא השוואה בין התדירות הזוויתית שחושבה והתדירות שחולצה מההתאמה לגרף

$$\omega = 6.021 \pm 0.005 \cdot 10^8 \frac{rad}{sec}$$

$$\omega_{fit} = 6.07415078 \cdot 10^8 \pm 0 \frac{rad}{sec}$$

למרות שאין חפיפה בתחום השגיאה המרחק היחסי בין הערכים הנונמלים הוא  $0.88\% \approx \frac{|\omega - \omega_{fit}|}{\omega} \cdot 100\%$  כלומר פחות מאחוז מהגודל הכולל המעיד על התאמה לא רעה.

בנוסף, ניתן לראות שרמת ההתאמה לגרף היא  $R^2 = 0.9893$ . ערך זה מראה קירוב טוב, אך רחוק מלהיות מדויק. פערים אלו יכולים להיגרם ממספר סיבות והשילוב ביניהן:

המדידות לא היו מדויקות - במהלך הניסוי נתקלנו בתופעה שמכשיר שהסקופ גורם להזזה של חלק מהערכים הנמדדים במהלך הזזת הסמנים שלו, תופעה זו הקשת על ביצוע המדידות (שכן לא יכולנו להשתמש בסמנים).

שגיאות אינטגרציה - במהלך אנליזת הנתונים מתבצעת אינטגרציה נומרית אשר מוספיה שגיאות (עקב הקירובים הנומריים) ועקב כך שיש מעט דגימות.

תופעות אלו עלולות להשפיע לרעה על התאמת העקום ועקב כך על הערכים שחולצו ממנו.

## מסקנות

בחלקו הראשון של הניסוי מדדנו את קבוע הסליל ב-3 דרכים שונות, בדרך הראשונה קיבלנו  $k_1 = 4400 \pm 400 \frac{1}{m}$  בעל שגיאה יחסית של כ-9.1% בשנייה  $k_2 = 5200 \pm 500 \frac{1}{m}$  בעל שגיאה יחסית של כ-9.6% ובשלישית  $k_3 = 4923 \pm 5 \frac{1}{m}$  בעל שגיאה יחסית של 0.1%.

ניתן לראות על פי השגיאה היחסית ש- $k_3$  מדויק משמעותית משאר הערכים. בנוסף הוא מוכל בתחום הערכים של  $k_2$  ומשיק לקצה התחום של  $k_1$  ומכאן נסיק ששיטת המדידה השלישית היא המדויקת ביותר. ואומנם, השוואה עם הערך שחושב לפי מידות הסליל לא תואם למדידה זו. יתכן שהפער נובע מכך שמיקום הדגם בתוך הסליל הוא לא בדיוק במרכז. בניסוי המשך יש לאשש זאת עם מדידות יותר מדויקות של מיקום הדגם בסליל הפנימי וחישוב של ערך תיאורטי מדויק יותר. בחלקו השני של הניסוי קיבלנו  $T_2 = 67 \pm 10 ns$  בעל שגיאה של כ-15% תחום המכיל את הערך המקובל בספרות. כמסקנות מהשגיאות האפשרויות שעלו בדיון ניתן להקטין את טווח השגיאה על ידי בדיקת תקינות הסקופ וביצוע מספר גדול בהרבה של מדידות לשם הקטנת שגיאת האינטגרציה.



## מקורות מידע

(1) תדריך ESR A,B.

(2) C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, Wiley, 2004

(3) A. Ghirri, C. Bonizzoni, D. Gerace, S. Sanna, A. Cassinese, M. Affronte; YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>

## נספח

• הנוסחה בה השתמשנו לחישוב השגיאות הנגררות בניסוי:

$$\delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots}$$

כאשר  $\delta x, \delta y, \dots$  הן השגיאות של  $x, y, \dots$  ו- $\delta F$  היא השגיאה הנגררת של  $F$ , שהיא פונקציה של המשתנים

$x, y, \dots$ .

• הנוסחה בה השתמשנו לחישוב השגיאה היחסית בין הערכים המדודים לתיאורטיים בניסוי:

$$\xi_{rel \ err} = \frac{\delta v}{v} \cdot 100\%$$