

ניסוי ESR

שם: נתיב מאור | ת"ז: 319002911 | דוא"ל: nativ.maor@campus.technion.ac.il

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

May 5, 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. בניסוי השני, בעזרת מדידות אות התהודה כתלות בזרם הישר ב סליל החיצוני נמדדה נגזרת אות הבליעה לפי הזרם, ממנה שוחזר אות הבליעה כתלות בזרם, וממנו חושב מקדם הרלקסציה T_2 של דגם $DPPH$. קיבלנו תוצאות ש(לא?) עומדות בקנה אחד עם התיאוריה והערכים המקובלים בספרות.

מבוא

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

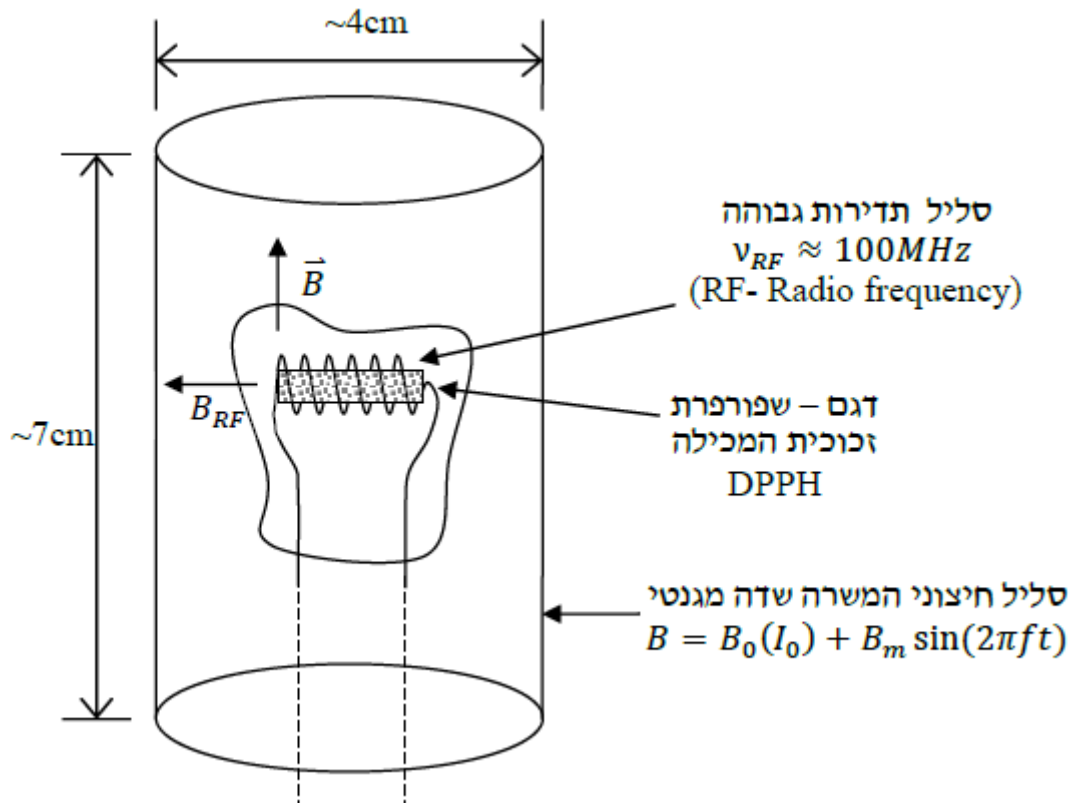
לחלקיקים בעלי ספין כגון אלקטרונים יש מומנט מגנטי, לכן בעת צימוד לשדה מגנט האנרגיה במצבים השונים נקבעת לפי

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

כש g קבוע הפיצול, $\mu_B = 0.927 \cdot 10^{-23} [\frac{J}{T}]$ הוא המגנטון של בוהר, 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

$$(1) \Delta U = g\mu_B B$$

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 בתרשים הבא:



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:

$$(2) \frac{h\nu_{RF}}{g\mu_B} = B_{res}$$

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

בניסוי נמדד בעזרת אוסצילוסקופ המתח על הגליל החיצוני - שממנו ניתן לגזור את הזרם בגליל בעזרת חוק אוהם:

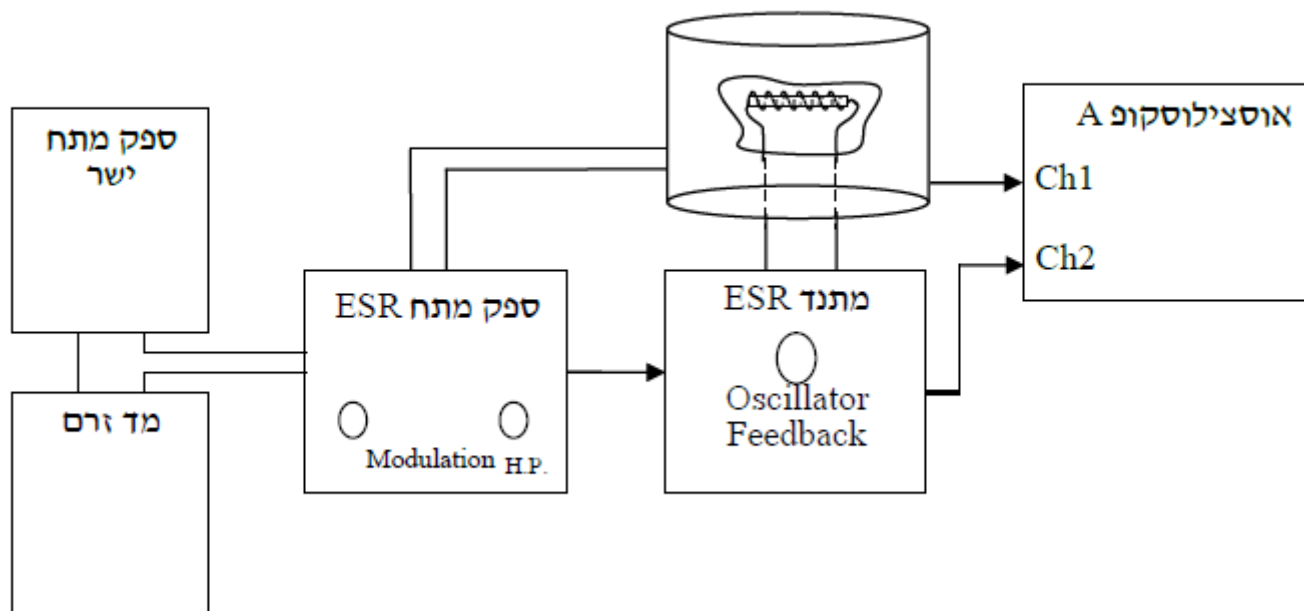
$$(3) V = I \cdot R$$

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

$$(4) \frac{B}{\mu_0} = kI$$

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

מערכת הניסוי בשני חלקיה מתוארים בתרשים הבא:



איור 2: תרשים מערכת הניסוי (איור 3 בתדריך)

הסליל החיצוני, הפנימי והדגם מתוארים על ידי הגליל שמעל המלבן המציג את מתנד ה- ESR .

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 שדה משתנה:

$$(5) \quad B = \mu_0 k (I_0 + I_m \sin(2\pi ft))$$

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 בדרכים שונות. בחלק הזה I_m נקבע על ידי מודולציה דרך ספק ה- ESR . בחלק השני של הניסוי, I_m נשלט על ידי המחולל של האוסצילוסקופ. אז, על ידי שליטה בגודל חלון המדידה כך שהקשר בין 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:

$$(6) V_{absorb} \propto \frac{\omega_0 \cdot \omega \cdot T_2}{1 + (\omega_0 - \omega)^2 \cdot T_2^2}$$

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

(צריך להפנות לשגיאות, לסדר גדלים של גרפים, להשלים נוסחאות והערות אחרות שרשמתי. **הכי חשוב** להסביר את $A \sim$ ויחידות של אות הבליעה, לדעתי רק פרופורציוני לכן אין משמעות)

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 שהתנגדות הנגד היא

$$r = 0.827 \pm 0.0012$$

ערך זה מוכל בערך הנתון בתדריך.

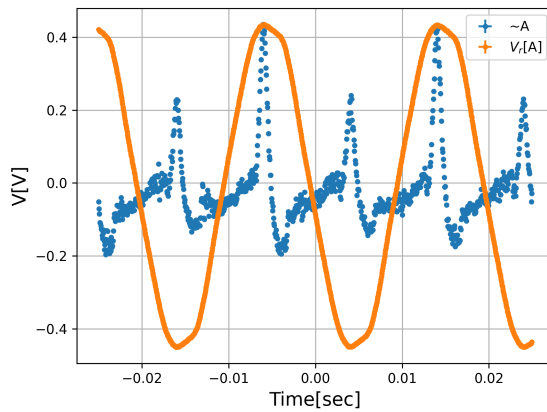
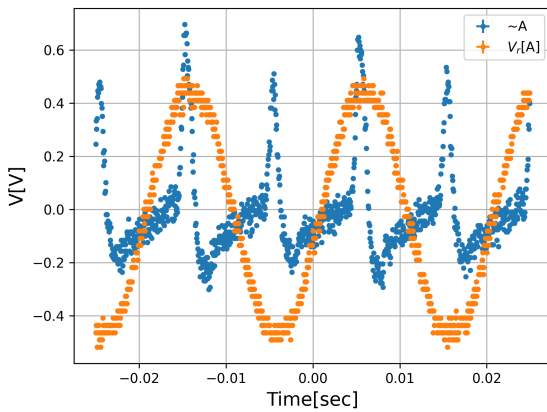
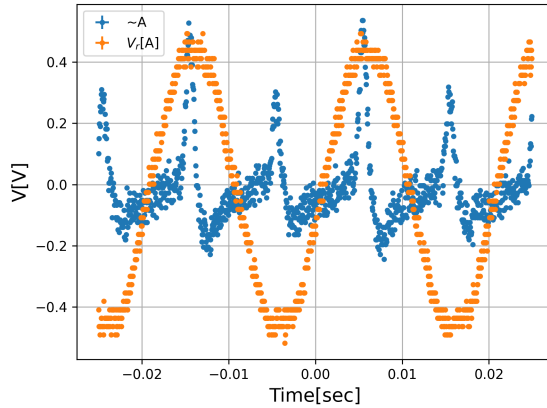
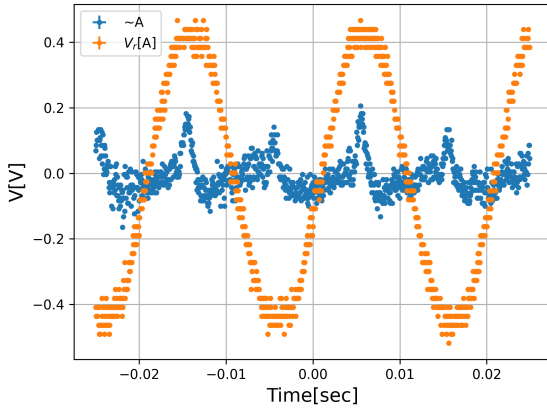
לאחר מכן חיברנו את מערכת הניסוי והפעלנו את המודולציה כשהיא מכוונת למקסימום. שינינו את קיבול הקבל במערכת *feedback* בשביל לקבל בליעה מקסימלית. מתוך הערכים הנתונים על החוגה והערך שבחרנו חילצנו בעזרת אקסטרפולציה לינארית את תדר הסליל הקטן

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

מתוך נוסחה (!) חישבנו את עוצמת השדה המגנטי שיצור תהודה בתדר זה

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

בשלב זה שינינו את ערך המודולציה 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 $A \sim$ (ולכן פרופורציוני לבליעה), הכתומות המתח על הנגד שנמצא בטור לסליל V_r ופרופורציוני 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. מתוך גרף 3 אשר מהווה את הרגע בו הבליעה מקסימלית נחלץ את המתח המקסימלי בסליל בעזרת ערך הנגד שמדדנו נמצא את הזרם המקסימלי.

בעזרת נתונים אלו על פי נוסחה (?) נקבל

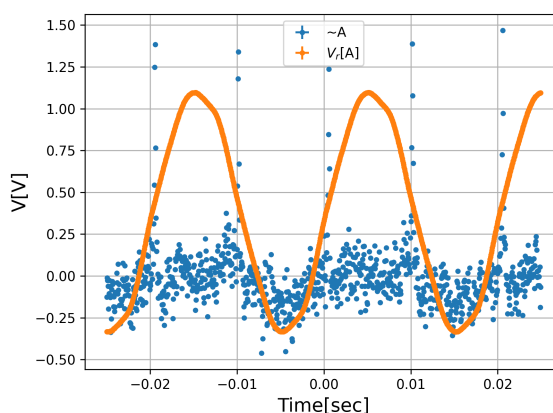
$$k_1 = \frac{H}{I} = \frac{B_{res}/\mu_0}{I} = 4438 \pm 8 \frac{1}{m}$$

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 שיש מרחק שווה בין השיאים, המרחק בלתי תלוי במתח על הסליל החיצוני ושהשיאים מתקבלים בנקודת ההתאפסות של המודולציה.

עבור הזרם

$$I = 0.5241 \pm 0.0001 A$$

התקבלו 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 $\sim A$ (ולכן פרופורציוני לבליעה), הכתומות המתח על הנגד שנמצא בטור לסליל V_r ופרופורציוני למודולציה + המתח הישר.

קווי השגיאה קטנים מכדי לראותם בגרף.

ניתן לראות שהקריטריונים מתקיימת מבחינה איכותית בקירוב.

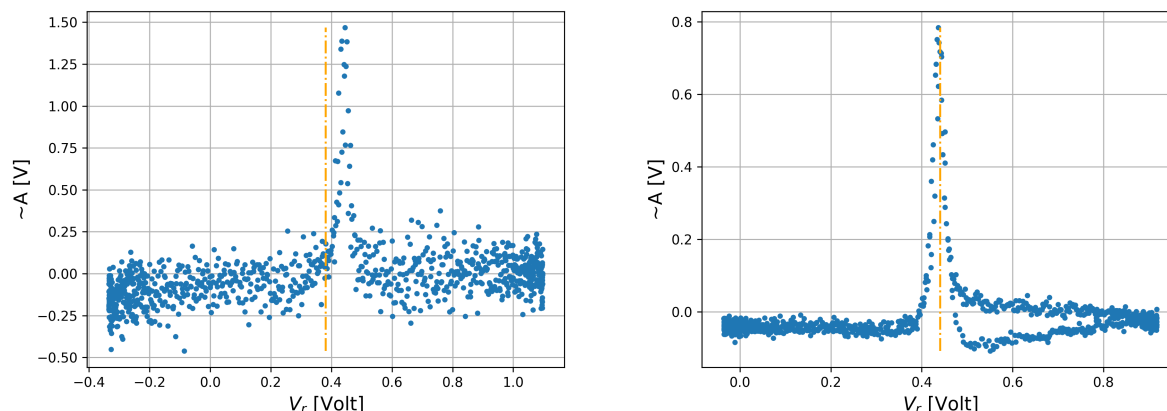
על פי נוסחה (?) נקבל

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

בשלב זה העברנו את הסקופ למצב XY ושינינו את הזרם הישר I_0 כך שתתקבל תמונה סימטרית. 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 נוסחה (?) חושב

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

חלק שני

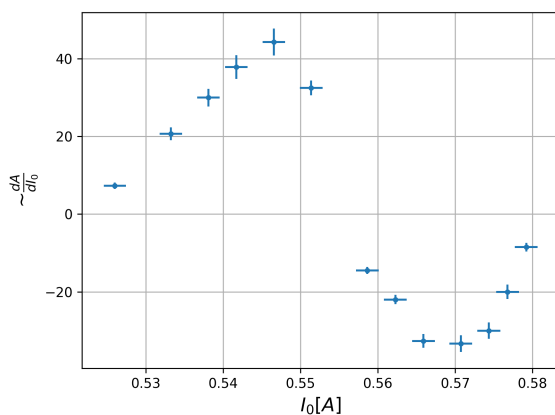
חיברנו את המערכת בצורה בה הזרם הזורם בסליל החיצוני הוא סכום הזרמים של המודלציה וספק הזרם הישר. הדלקנו את המערכת ובחרנו קיבול במערכת ה- $feedback$ כך שיראו בירור קווי בליעה, בדומה לחלק הראשון ביצענו אקסטרפולציה לינארית וקיבלנו

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

$$\omega = 6.021 \pm 0.005 \cdot 10^8$$

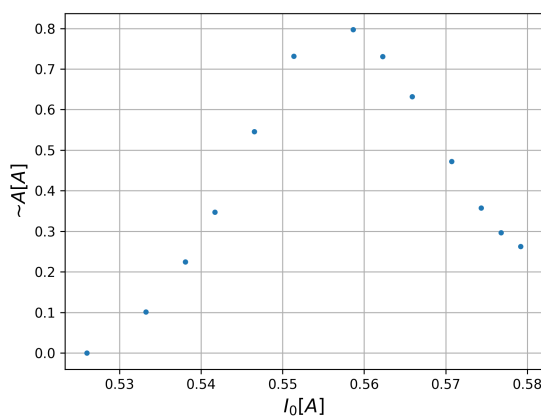
העברנו את הסקופ להצגת XY ובחרנו זרם I_0 כך שהתמונה תהיה סימטרית (באופן זהה למדידה 3 בחלק הראשון). בשלב זה כיבינו את המודלציה והפעלנו את מייצר הגלים של הסקופ על תדירות $1kHz$ ומשרעת מקסימלית, שינינו באיטיות את הזרם I_0 בשביל לזהות את התחום שלו שבו מתקיימת בליעה. לשם מדידת הנגזרת של אות הבליעה הקטנו את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



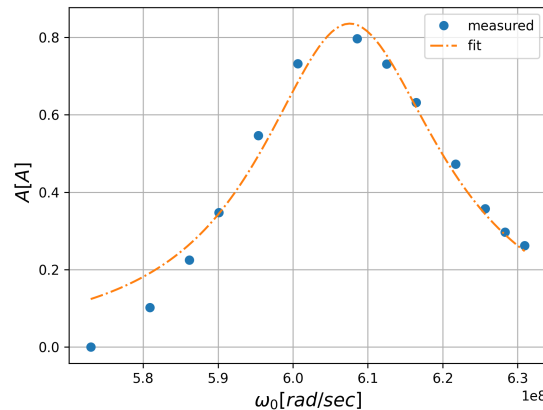
גרף 9: אות הבליעה לפי הזרם הישר I_0

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 נוסחה (!) ועשינו התאמה לפונקציה

$$P = \frac{\omega \omega_0 T_2 C}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2}$$

(שייך למבוא? להגדיר משתנים)

התקבלה ההתאמה הבאה:



גרף 9: אות הבליעה לפי התדירות הזוויתית ω_0

ציר ה- x את התדירות הזוויתית ω_0 ברדיאן לשנייה וה- y הוא אות הבליעה.

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

מתוך ההתאמה חולצו המקדמים

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

$$T_2 = 67 \pm 10 ns$$

(אולי שייך לדיון)

ניתן לראות ω_{fit} נמצא לא 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 $T_2^{theory} = 62 ns$ אך שווה לציין שטווח השגיאה גדול כנראה עקב אי-התאמה גבוהה.

מסקנות

מקורות מידע

(1) תדריך A,B ESR.

(2) <https://arxiv.org/pdf/1503.06145.pdf> (לכתוב כמו שצריך)

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- δF היא השגיאה הנגררת של F , שהיא פונקציה של המשתנים

x, y, \dots .

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

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