

מפגש שני של ESR

קראו את:

Introduction to Solid State Physics / C. Kittel 3rd ed (1996) ch. 16 pp. 501-510

הדפים הסרוקים מופיעים באתר הקורס.

במידה זו המטרה היא למדוד את הנגזרת של אות הבליעה במערכת ה-ESR. כפי שקראתם, נגזרת אות הבליעה מכילה מידע על זמן הרלקסציה של הספינים בדגם ה-DPPH, בדומה לאות הבליעה עצמו (ראו יחסי קרמס-קרוניג). לאחר מדידת הנגזרת, ניתן לבצע אינטגרציה לקבלת האות המקורי, באופן שאינו תלוי בשיטת המדידה בה השתמשתם בחלק הראשון של הניסוי. בכך, אתם יכולים להפריד בין האות עצמו לבין השפעות שיטות המדידה השונות על צורת האות.

לשם תכנון המדידה, נתחיל מהגדרת הנגזרת: בהינתן פונקציה $f(x)$ הנגזרת בנקודה $x = x_0$ מתקבלת מהגבול הבא:

$$f'(x_0) = \lim_{x_1 \rightarrow x_0} \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

נחזור לניסוי – נסמן את הזרם בסליל החיצוני ב- x ואת אות התהודה ב- $f(x)$. זהו בעצם העקום שמדדתם כאשר העברתם את הסקופ למצב XY בחלק הראשון של הניסוי. אנחנו רוצים למדוד את הנגזרת של העקום הזה.

כדי למדוד את הנגזרת ב- x_0 מסוים נצטרך למדוד את שני הערכים $f(x_0)$ ו- $f(x_1)$, כאשר x_1 צריך "לשאוף" ל- x_0 . כמובן שמבחינה ניסיונית לא ניתן להקטין את ההפרש בין ה- x ים כרצוננו, ואנחנו מוגבלים לרזולוציה מסוימת. לפיכך, הגודל שנקבל מהביטוי

$$\frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

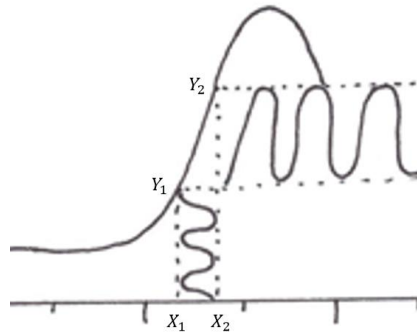
הוא רק קירוב של הנגזרת, ברוב המקרים. במקרה בו $f(x)$ היא פונקציה לינארית, הביטוי הנ"ל דווקא מדויק! הדבר נכון גם אם $f(x)$ לינארית למקוטעין, כל עוד מקפידים לבחור את x_0, x_1 כך ש- $f(x)$ לינארית בקטע $[x_0, x_1]$. אז, אין צורך שגודל הקטע ישאף ל-0.

במערכת הניסוי, האות שאתם מודדים אינו לינארי למקוטעין, אך מכיוון שהוא רועש ישנם מקטעים קטנים (אך סופיים) לאורכו בהם הוא לינארי בקירוב ולא ניתן להבחין בעקמומיות (אם תעשו "zoom" תוכלו לראות מקטעים "ישרים"). אתם תצטרכו לוודא (ויזואלית) שהמקטעים בהם אתם מודדים אכן קטנים מספיק.

כעת צריך לתכנן כיצד למדוד בפועל את $f(x_0), f(x_1)$ - הרי מערכת הגילוי מבוססת על מעגל feedback שלא ייצר אות עבור מצב יציב ולכן לא ניתן "לעמוד" על ערכי x_0 נתונים כדי לבצע מדידה. לשם כך ננצל את ה-wave generator של הסקופ כדי לגרום ל- x להיות אות סינוסי שמתנדנד בקטע $[x_0, x_1]$ ו"סורק" מקטע קטן של $f(x)$. אמפליטודת הסינוס (peak-to-peak) שווה ל- $|x_1 - x_0|$ וניתן למדוד אותה בעזרת

הסקופ. כדי שנוכל לחשב את הנגזרת, נשאר למדוד את $|f(x_1) - f(x_0)|$ ולקבוע את הסימן היחסי בין שני הביטויים.

את $|f(x_1) - f(x_0)|$ נקבל על ידי מדידת האמפליטודה של אות התהודה בסקופ, שגם היא תהיה פונקציית סינוס (אם אכן בחרנו מקטע קטן מספיק). ראו איור כדי להשתכנע מדוע זה כך:



כאן $Y_i = f(X_i), i \in \{1, 2\}$.

את הסימן היחסי (כלומר האם הנגזרת חיובית או שלילית) נקבל מהפאזה בין שני הסינוסים: כאשר הנגזרת חיובית, הפאזה היא 0° וכאשר הנגזרת שלילית היא 180° (חשבו על האיור). כדי להיזן את הסינוס של x כך שיתנדנד סביב נקודות שונות באות התהודה נשתמש בספק ה-DC מהחלק הראשון של הניסוי, כך שהזרם בסליל החיצוני יהיה סכום הזרמים:

$$x = x_{DC} + |x_1 - x_0| \cdot \sin(2\pi f_x t)$$

במערכת הניסוי, הזרם בסליל החיצוני נמדד בערוץ X של הסקופ ואות התהודה נמדד בערוץ Y לכן:

$$\begin{aligned} f'(x_{DC}) &= \frac{|f(x_1) - f(x_0)|}{|x_1 - x_0|} \cdot (\text{relative sign}) \\ &= \left(\frac{\text{Amplitude}(Y)}{\text{Amplitude}(X)} \cdot (\text{relative sign}) \right)_{\text{at } x_{DC}} \end{aligned}$$

כמובן שביטוי זה לנגזרת מדויק רק כאשר הערך של $\text{Amplitude}(X)$ קטן מספיק. חישבו: סביב איזו נקודה בעקום התהודה נדרשת האמפליטודה הקטנה ביותר (מהו "צוואר הבקבוק" של התנאי הזה)?

מדידת הנגזרת של אות הבליעה

(1) וודאו שספק ה-DC וה-Wave-Generator של הסקופ מחוברים לספק ה-ESR. באופן זה מוזרם לסליל החיצוני הסכום של הזרמים שהם מספקים. וודאו שהמולטימטר שמדד זרם בחלק הראשון של הניסוי מנותק מהמעגל.

(2) הדליקו את מערכת ה-ESR ואת ספק ה-DC (ראו הנחיות מסעיפים קודמים) וצרו את המצב בו הזרם I_0 מייצר את H_{res} בסליל החיצוני. השתמשו בתצוגת XY בסקופ לשם כך.

(3) כבו את מתג המודולציה והפעילו את Wave Gen בסקופ. צרו גל סינוסי עם תדר של 1kHz ואמפליטודה מקסימאלית.

- (4) שנו באיטיות את מתח ה-DC ועברו על כל תחום אות הבליעה, מתחילת התגובה ועד לסופה (התאפסות אות ה-FeedBack משני צידי התהודה). הגדילו את התצוגה כדי לראות אות זה בבירור.
- (5) הקטינו את האמפליטודה של הסינוס ב-Wave Gen עד שהאות שעל הסקופ הוא קו ישר עבור כל זרמי ה-DC בתחום התהודה, כדי שחלוקת השינוי בערוץ Y בשינוי בערוץ X תהווה מדידה מדויקת של הנגזרת. שימו לב במיוחד להתנהגות האות סביב נקודת המקסימום של התהודה. רשמו את האמפליטודה שבחרתם עבור הסינוס ב-Wave Gen. באופן זה אתם מבטיחים שאתם עומדים באופן מספק בתנאי $x_1 \rightarrow x_0$ על מנת למדוד קירוב טוב של הנגזרת.
- (6) חזרו למצב Normal בסקופ. ייצבו את התמונה כך שרואים את שני האותות כסינוסים על המסך ברזולוציה גבוהה: קבעו את מקור ה-Trigger להיות Wave Gen וב-Acquire בחרו ב-Averaging עם מספר מחזורים מתאים.
- (7) בעזרת meas, מדדו את האמפליטודה של כל אות, ואת הפאזה ביניהם (אילו ערכים הפאזה הזאת יכולה לקבל?). הוסיפו את הממוצע של האות X כדי לדעת מהו הזרם I_0 .
- (8) מדדו את האמפליטודות של שני האותות ואת הפאזה ביניהם בכל תחום הבליעה (לפי השינוי באמפליטודת ערוץ Y). צרו גרף שמציג את הנגזרת של האות הבליעה כתלות ב- I_0 .
- (9) הוסיפו נקודות לגרף עד שהוא יתאים לגרף המתאר את הנגזרת של אות הבליעה הצפוי לפי הפרק שקראתם מספרו של Kittel. בצעו אינטגרציה נומרית (cumtrapz()) על המדידות וחשבו את אות הבליעה.
- (10) השוו את אות הבליעה המחושב לאות שקיבלתם בחלק הראשון של הניסוי באמצעות גרף. האם זהו אותו אות בליעה? האם רוחב אות הבליעה זהה? נמקו.
- (11) תרגמו את ציר X מ- I_0 ל- ω וחשבו את T_2 של DPPH. השוו לספרות.